

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫期末報告

膜過濾結垢機制及預防之研究-

改變掃流膜過濾之流力行為以減緩結垢之研究(3/3)

計畫類別：☐個別型計畫 ☒整合型計畫

計畫編號：NSC 96-2221-E-032-020

執行期間：96 年 8 月 1 日至 97 年 7 月 31 日

計畫主持人：吳容銘

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： ☒完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- ☐赴國外出差或研習心得報告一份
- ☐赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- ☒出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- ☐國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、列管計畫及
下列情形者外，得立即公開查詢

☐ 涉及專利或其他智慧財產權，☐ 一年☐ 二年後可公開查詢

執行單位：淡江大學化學工程與材料工程學系

中 華 民 國 九 十 七 年 七 月 二 十 五 日

目錄

	頁次
目錄	III
圖表目錄	VI
第一章 緒論	1
1.1 前言	1
1.2 研究動機與目的	4
第二章 文獻回顧	6
2-1 流體力學之研究	7
2-2 粒子移動軌跡	10
2-3 濾速與阻力之探討	13
2-3-1 濾速之預測	17
2-3-2 過濾之阻力分析	18
2.4 過濾阻塞機制之研究	20
第三章 實驗方法	27
3-1 實驗物料與濾膜之種類	27
3-2 掃流過濾實驗裝置	29

3-2-1 掃流過濾基本構造	29
3-3 實驗步驟	35
3-4 管式膜實驗與濾膜	37
3-5 實驗裝置	38
3-5-1 管式膜過濾基本構造	38
3-5-2 外加側流之管式膜過濾構造	41
3-5-3 間歇性反洗操作之管式膜過濾(Case-1)基本構造	44
3-5-4 間歇性反洗操作之管式膜過濾(Case-2)基本構造	44
3-6 實驗分析儀器	47
3-7 實驗步驟	47
3-8 實驗操作條件	48
3-9 薄膜之清洗	50
第四章 實驗與數值分析方法	51
4-1 基本假設	51
4-2 裝置中流場空間之模擬	52
4-2-1 模型之空間建構	52
4-2-2 網格之建立	55
4-3 統御方程式與邊界條件	57
4-3-1 連續方程式	57

4-3-2 穩態的 Navier-Stokes 方程式	58
4-4 數值方法	62
第五章 結果與討論	64
5-1 掃流過濾實驗數據分析	64
5-2 掃流過濾阻力模擬之分析	76
5-3 掃流過濾膜面之受力分析	83
5-4 有側流之掃流過濾膜面受力分析	88
5-5 有側流之掃流過濾實驗數據分析	93
5-6 有側流之掃流過濾阻力模擬分析	99
5-7 濾餅形成之動態分析	108
5-8 操作條件對濾速之影響	113
5-8-1 懸浮液濃度對濾速之影響	113
5-8-2 過濾壓差對濾速之影響	116
5-8-3 掃流速度對濾速之影響	118
5-9 膜面上之受力對濾速之影響	120
5-9-1 管式膜過濾膜面受力分析	120
5-9-2 外加側流之管式膜過濾膜面受力分析	122
5-10 外加側流之管式膜過濾實驗數據分析	127

5-11 反洗操作對濾速之影響	131
5-11-1 多相流模式之反洗模擬分析	131
5-11-2 間歇性反洗操作之管式膜過濾實驗數據分析	138
5-12 改變過濾策略之效率評估	140
第六章 結論	142
符號說明	148
參考文獻	160



圖表目錄

頁次

圖目錄

第一章

圖 1-1 比較垂直過濾和掃流過濾的不同	4
----------------------	---

第二章

圖 2-1 掃流過濾示意圖	6
圖 2-2 膜面上 x 方向各組成的受力變化情形	8
圖 2-3 平板式掃流過濾示意圖	15
圖 2-4 微過濾之阻力示意圖	18
圖 2-5 四種阻塞模式示意圖	20
圖 2-6 濃度極化分布圖	23
圖 2-7 反洗操作圖	25

第三章

圖 3-1 PMMA 粉體的 SEM 照片	26
圖 3-2 Mixed cellulose ester membrane 的正面 SEM 圖	27
圖 3-3 Mixed cellulose ester membrane 的剖面側視 SEM 圖	27

圖 3-4 掃流過濾基本系統拍攝圖	28
圖 3-5 掃流過濾基本系統之示意圖	29
圖 3-6 掃流過濾基本系統模組之構造圖	30
圖 3-7 基本掃流與有側流之進料方式示意圖	31
圖 3-8 有側流之掃流過濾系統拍攝圖	31
圖 3-9 有側流之掃流過濾系統示意圖	32
圖 3-10 有側流之掃流過濾系統模組構造圖	33
圖 3-11 管式膜過濾基本系統之示意圖	38
圖 3-12 管式膜過濾基本系統拍攝圖	39
圖 3-13 外加側流之進流方式示意圖	40
圖 3-14 外加側流之管式膜過濾基本系統拍攝圖	41
圖 3-15 外加側流之管式膜過濾基本系統之示意圖	42
圖 3-16 間歇性反洗操作(Case-1)之管式膜過濾基本系統之示意圖	44
圖 3-17 間歇性反洗操作(Case-2)之管式膜過濾基本系統之示意圖	45

第四章

圖 4-1 掃流過濾裝置中流場空間的比例圖	52
圖 4-2 有側流之掃流過濾裝置中流場空間的比例圖	52
圖 4-3 管式膜過濾裝置中流場空間的比例圖	53
圖 4-4 外加側流之管式膜過濾裝置中流場空間的比例圖	53

圖 4-5 掃流過濾裝置中流場空間的網格圖	55
圖 4-6 有側流之掃流過濾裝置中流場空間的網格圖	55
圖 4-7 管式膜過濾裝置中流場空間之網格圖	56
圖 4-8 系統中各部份在計算上的統御方程式與邊界條件示意圖	59
圖 4-9 系統中在計算上的統御方程式與邊界條件示意圖	60
圖 4-10 數值模擬之疊代計算流程圖	62

第五章

圖 5-1 定懸浮液濃度與定過濾壓差下不同的掃流速度與濾速關係	64
圖 5-2 不同操作條件下對掃流速度作圖	67
圖 5-3 定掃流速度與定懸浮液濃度下不同的過濾壓差與濾速關係	69
圖 5-4 不同操作條件下穩對過濾壓差作圖	71
圖 5-5 定掃流速度與定過濾壓差下不同的懸浮液濃度與濾速關係	73
圖 5-6 不同操作條件下對懸浮液濃度作圖	75
圖 5-7 不同操作條件下的實驗數據與回歸曲線之呈現	77
圖 5-8 不同懸浮液濃度下濾速與過濾總阻力隨時間變化之模擬	79
圖 5-9 不同掃流速度及過濾壓差下濾速與過濾總阻力隨時間變化之 模擬關係圖	80
圖 5-10 不同操作條件下過濾總阻力隨時間變化之模擬比較	82
圖 5-11 濾室內不同高度的速度分佈圖	84

圖 5-12 濾室內不同高度的速度分佈圖	85
圖 5-13 不同操作條件下膜面剪應力值之比較	87
圖 5-14 不同操作條件下膜面濾餅分佈之比較	87
圖 5-15 不同側流比例之膜面速度分佈圖	89
圖 5-16 不同側流比例下膜面剪應力值之比較	91
圖 5-17 不同側流比例下膜面濾餅分佈之比較	93
圖 5-18 不同過濾壓差下各側流比例之濾速變化情形	95
圖 5-19 不同側流比例下穩定濾速對過濾壓差作圖	97
圖 5-20 不同側流比例下濾餅重對過濾壓差作圖	98
圖 5-21 不同側流比例下過濾總阻力對過濾壓差作圖	98
圖 5-22 不同側流比例下實驗數據的回歸曲線之呈現	100
圖 5-23 各側流比例下濾速與過濾總阻力隨時間變化之模擬	101
圖 5-24 不同側流比例下過濾總阻力隨時間變化之模擬比較	102
圖 5-25 不同側流比例下實驗數據的回歸曲線之呈現	104
圖 5-26 不同側流比例下實驗數據的回歸曲線之呈現	104
圖 5-27 各側流比例下濾速與過濾總阻力隨時間變化之模擬	105
圖 5-28 各側流比例下濾速與過濾總阻力隨時間變化之模擬	106
圖 5-29 不同側流比例下過濾總阻力隨時間變化之模擬比較	107
圖 5-30 不同側流比例下過濾總阻力隨時間變化之模擬比較	107

圖 5-31 濾餅重、濾餅層厚度與濾餅平均孔隙度隨時間之變化	108
圖 5-32 不同過濾時間下膜面濾餅堆積的情形	110
圖 5-33 過濾時間 $t=500\text{sec}$ 之濾餅 SEM 拍攝圖	111
圖 5-34 過濾時間 $t=5000\text{sec}$ 之濾餅 SEM 拍攝圖	112
圖 5-35 定過濾壓差與定掃流速度下懸浮液濃度對濾速之影響	115
圖 5-36 不同懸浮液濃度下過濾總阻力隨時間之變化情形	115
圖 5-37 定懸浮液濃度與定掃流速度下過濾壓差對濾速之影響	117
圖 5-38 不同過濾壓差下過濾總阻力隨時間之變化情形	117
圖 5-39 定過濾壓差與定懸浮液濃度下掃流速度對濾速之影響	119
圖 5-40 不同掃流速度下過濾總阻力隨時間之變化情形	119
圖 5-41 濾室內之掃流速度分佈圖	121
圖 5-42 不同掃流速度下膜面剪應力值之比較	122
圖 5-43 有無外加側流膜面上之速度分佈圖	124
圖 5-44 有無外加側流膜面剪應力值之比較	125
圖 5-45 定過濾壓差與定懸浮液濃度下有無外加側流對濾速之影響	128
圖 5-46 有無外加側流之過濾總阻力隨時間之變化情形	128
圖 5-47 定過濾壓差與定懸浮液濃度下不同側流比例對濾速之影響	130
圖 5-48 不同側流比例下過濾總阻力隨時間之變化情形	130
圖 5-49 反洗模組(Case-1)之結構圖	132

圖 5-50 反洗程序 1-30s 之膜面上粒子體積分率變化情形(Case-1)	133
圖 5-51 反洗模組(Case-2)之結構圖	135
圖 5-52 反洗程序 1-30s 之膜面上粒子體積分率變化情形(Case-2)	136
圖 5-53 下半部膜管反洗 30 s 之比較	137
圖 5-54 不同結構之間歇性反洗操作對濾速之影響	139
圖 5-55 不同結構之間歇性反洗操作下過濾總阻力隨時間之變化情形	139
圖 5-56 改變過濾策略之比較	141

表目錄

第二章

表 2.1 常用薄膜清洗溶劑與用途	25
-------------------	----

第三章

表 3-1 操作條件整理表	35
---------------	----

表 3-2 調整掃流端與側流端之進料量各種比例條件	35
---------------------------	----

表 3-3 複合陶瓷膜之性質	36
----------------	----

第五章

表 5.1 改變過濾策略之效率評估	141
-------------------	-----



第一章 序論

1-1 前言

時代的變遷，隨著產業結構的不同而對產品的品質要求也相對的
大大提升，因此，生產過程中製程方式的改進會影響產品品質的提
升，薄膜分離技術就是其中的一個例子。不論是目前的化學工業、食
品工業、電子產業或是生醫科技等，都與薄膜分離技術息息相關，要
得到高品質的產物就需要良好的製程程序，例如針對電子產業、生醫
科技而言，高品質的製程用水乃是相當重要的，這時候就需要精密的
薄膜分離技術來達到所需的品質。薄膜過濾之所以仍在現今各產業上
被廣泛使用，主要因為薄膜過濾能滿足不同製程中之操作所需，以及
多種過濾方式，讓薄膜過濾技術依然是製程中不可或缺的分離方法。
現今薄膜過濾技術的應用越來越廣泛，已成為產業上重要技術之一，
在提高產品純度、收集率、及減少能量消耗和製程時間等方面已有相
當不錯的貢獻。

薄膜過濾技術能夠成為各類科技產業過濾方式的主流，原因在於
薄膜過濾有以下幾項優點（Mulder, 1991）：

- (1) 能夠節約能源：在薄膜過濾的操作中，不需要涉及到相變化，所
以可以省下許多能源。
- (2) 可於常溫程序中操作：薄膜過濾程序，不需要在高溫或低溫環境

下即可達到相分離的效果。

- (3) 減少環境污染：由於薄膜過濾程序中，不需要添加額外的化學藥劑，所以不會造成二次污染。
- (4) 操作方便：一般的薄膜分離技術中，常利用壓力差使溶液通過薄膜，達到過濾的效果；此種方式可以克服傳統萃取操作利用密度差來達到分離效果的限制。

薄膜是一種具有阻隔功能的界面相，除此之外，尚有限制、選擇或調節某些物質通過的能力，薄膜分離即是利用物質通過薄膜的差異性，來達到分離、濃縮及純化的目的。薄膜分離的方式主要是利用壓力差、濃度差、溫度差，或是電位差為驅動力(driving force)，使不同成分的物質能夠藉由透膜速率上的差異，由一端傳送至另一界面。分別說明如下 (Mulder, 1991)：

- (1) 壓力差：利用在薄膜兩側的壓力差造成的強制對流，將小分子滲透過薄膜，而大分子則因為被薄膜阻隔的關係停留在膜面上 (Ho and Sirkar, 1992)。常見以壓力差作為驅動力而分離的方式有微過濾(Microfiltration, MF)、超過濾(Ultrafiltration, UF)、奈米過濾(Nanofiltration, NF)、逆滲透(Reverse osmosis, RO)。
- (2) 濃度差：利用在薄膜兩側的濃度差產生的擴散現象，將物質由濃度高的一端，傳送至濃度低的一端。常見以濃度差作為驅動力而

分離的方式為透析(Dialysis) (Mulder, 1991)。

- (3) 溫度差：利用在薄膜兩側的溫度差產生的熱傳現象，由溫度較高處傳送至溫度較低的一端。常見以溫度差作為驅動力而分離的方式為薄膜蒸餾(Membrane distillation)。
- (4) 電位差：利用在薄膜兩側不同的電位，將帶有不同電荷之物質因遷移率的不同而使其達到分離的效果 (Rautenbach and Albrecht, 1989)。常見以電位差作為驅動力而分離的方式為電透析(Electrodialysis)。

薄膜過濾的方式依懸浮液流動方向與濾面的水力狀況可分為垂直過濾(dead-end filtration)及掃流過濾(cross-flow filtration)兩種，如圖 1-1 所示。垂直過濾是以壓力為驅動力，懸浮液流動方向與薄膜垂直，通過濾材而得到濾液，這種過濾方式，會隨著過濾時間增長，被阻擋下來的粒子累積在濾面上形成濾餅、造成阻力，導致濾速嚴重衰減。另一種則為掃流過濾，掃流過濾仍以壓力為驅動力，但流動方向與濾面平行，其特性為流體以平行流過濾面的掃流速度，在濾面上形成剪切力來抑止濾餅的成長，使得濾速衰減較為緩慢，同時濾餅累積到一定程度便不再增加，因此掃流過濾適合連續長時間操作。

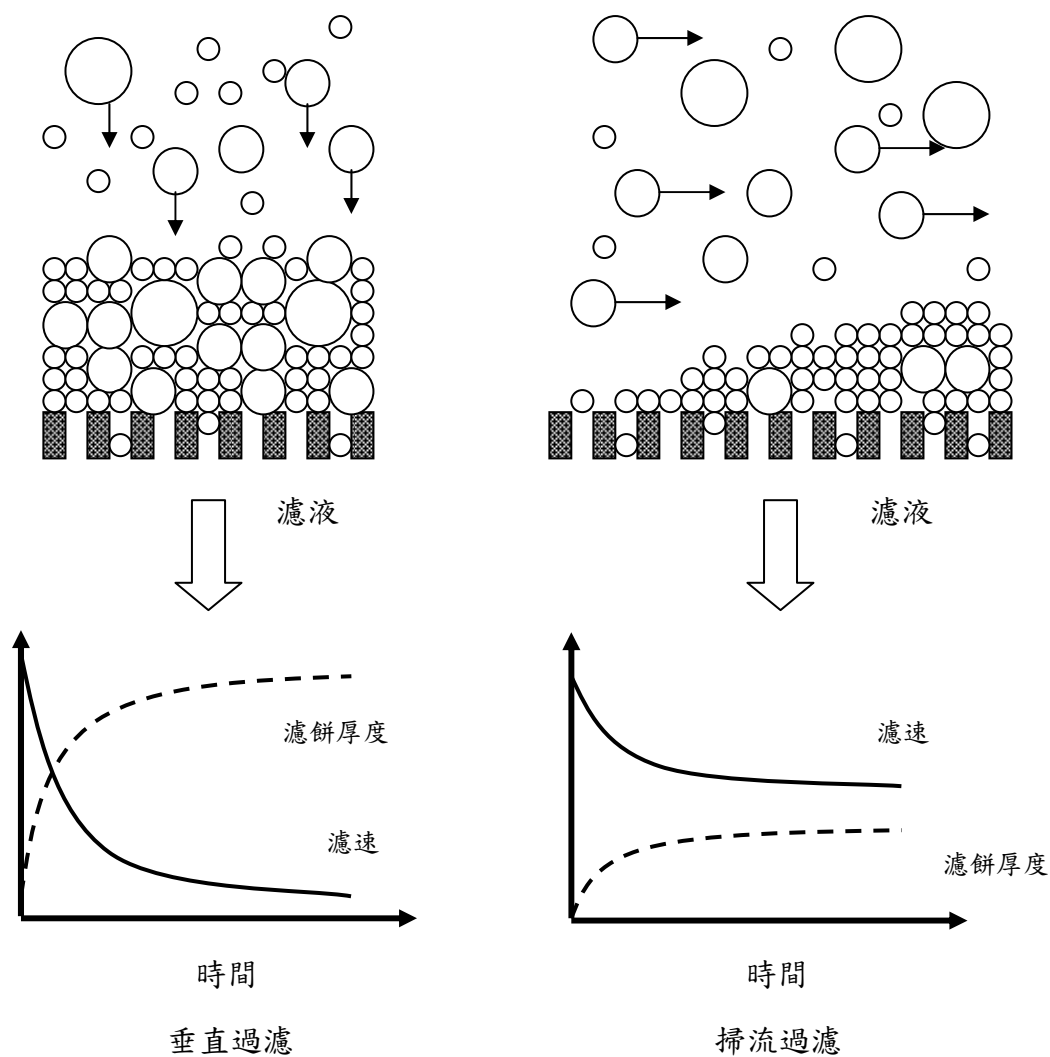


圖 1-1 比較垂直過濾和掃流過濾的不同

1-2 研究動機與目的

雖然掃流過濾能改進以往傳統 (dead-end) 過濾技術之濾速 (permeate flux) 隨時間快速遞減的缺點，但在濾面上仍然有細小粒子的累積而形成濾餅，造成過濾阻力。在薄膜過濾程序中，粒子沈積所造成的阻力對過濾效果影響甚鉅，因此，該如何減緩濾餅之生成而使過濾阻力降低、有效提升濾速，是薄膜過濾的首要課題。導致膜阻力上升的主要原因大致上有濃度極化 (concentration polarization) 與結垢

現象(fouling)兩種 (Aimar et al, 1991)，而這兩種現象是因為被薄膜阻隔之粒子隨著過濾時間的增加，沈積於膜面上的粒子量也愈來愈多。並且由前人的研究可以發現，這兩種現象的成因與模組之設計、流場中的流力行為有關 (Gupta et al, 1995)。

薄膜結垢(fouling)的預防與清洗的方法相當多，預防包括操作前針對膜的電性評估、膜與粒子間之交互作用的探討、抗結垢膜之製備、模組之設計、改變濾室中的流力行為而增加膜面上的剪應力等，而加以改善在操作時的結垢現象。以膜面清洗來減緩結垢而言，包括了化學清洗、機械清洗或水力清洗等方式，來清除膜面上的結垢。

已知改變流力行為能增加膜面上的剪應力，所以在本研究中乃利用側流(side-stream)的構思，希望改變濾室中的流力狀態，使膜面上的剪應力有所改變。因此針對實驗所得過濾速值以及使用計算流力(computational fluid dynamics, CFD)軟體加以模擬，探討是否會有改善薄膜結垢的情形、和觀察膜面上之剪應力的變化情形，進而達到提升過濾速的效果。另外，過濾阻力值也使用 CFD 軟體模擬出，加以探討說明。

第二章 文獻回顧

掃流過濾是一種在過濾過程中，能夠維持極薄的濾餅形成的過濾方法，此過濾方式是經由流體以平行流經濾面，所形成之剪應力來抑止濾餅的形成，圖 2-1 為掃流過濾示意圖，在掃流過濾中，懸浮液有兩個速度分佈：一個為濾液過濾方向；另一個為平行於濾面。因為有濾液通過濾面的方向而使固體粒子會被帶向濾面；另一方面，在平行濾面的方向所產生的剪應力與衝撞力，則使固體粒子有可能再被移離濾面。在過濾剛開始沒多久，即濾餅剛形成時，濾餅厚度上的壓力梯度相當高，使得粒子十分牢固地附著於濾材上。隨後在濾餅成長過程中，此梯度會逐漸降低，使得作用在單一粒子的力也減小。最後，由於懸浮液流動所造成的剪應力會超過其他力，使得粒子移動重回懸浮液中。

在過濾過程中，濾速的快慢往往可以決定程序的好壞，然而濾速的衰減乃是由各種因素所造成，包括了操作壓力、濃度、溫度、pH 值、及掃流速度等，各操作條件與過濾效果有密切的關係，因此了解製程最適的操作條件是很重要的。然而，操作條件的更改最直接的影響就是造成過濾阻力的懸浮粒子，因此就必須了解粒子在流態中的變化，以下就介紹在掃流過濾上，一些相關文獻的理論原理。

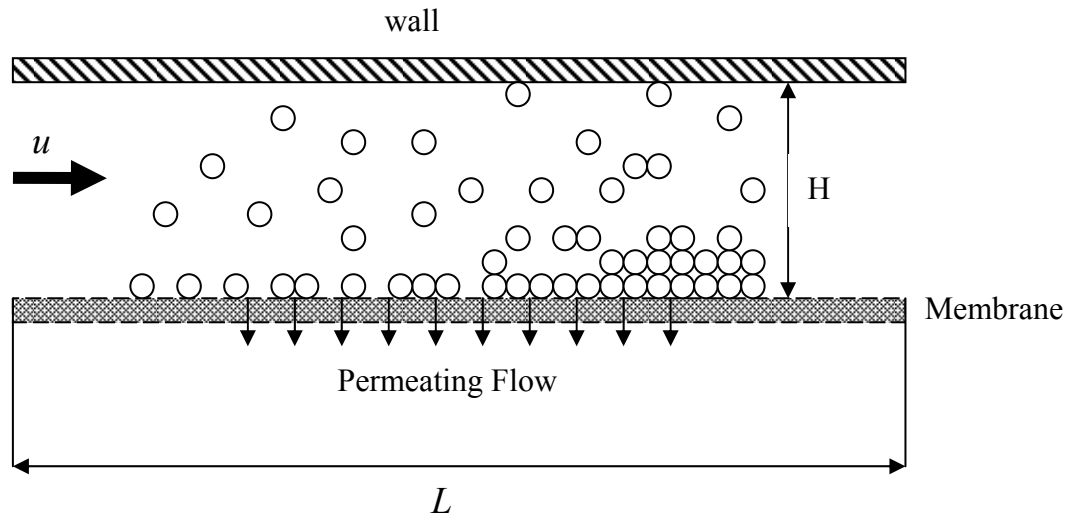


圖 2-1 掃流過濾示意圖

2-1 流體力學之研究

在固液分離程序中，濾室內的流體力學變化對過濾的效果影響甚鉅，因此許多學者針對流體力學上的變化，加以研究分析。其中，Berman(1953)首先以層流解出流體在兩多孔介質平板中流動的情形。Deen(1987)利用流體力學觀點去廣泛的研究、分析粒子在孔洞中的移動。Drew et al.(1991)研究出在多孔邊界的輸送管中，微小的懸浮球體在層流狀態下的流體力學效應，與快速流動下之間的關係。Hwang et al.(1995)提出流體力學與粒子間作用力的力平衡模式，來說明粒子在濾材表面上的受力情形。Bowen and Sharif(1998)說明在粒徑大於孔洞大小時，粉粒體與流體力學之間的顯著影響，進而解釋孔洞完全阻塞模式。因此他們建議使用具有較高表

面電位的薄膜。

許多學者試著將濾室內的流力狀態加以改變，經研究發現確實對濾速有所影響，其中 Gupta et al.(1995)以螺旋檔板應用於掃流微過濾，發現可提高濾速 50%。Millward et al.(1995)於膜面附近設立增進擾流之障礙物以提升濾速。Ma et al.(2000)合併脈衝逆洗與膜面改質(surface modification)技術，在低懸浮液濃度與短時間操作下可得到更好的濾速。Kuberkar and Davis(2001)比較掃流過濾與逆洗之不同，指出掃流過濾可減低外部濾餅(external cake)生成的速率，而逆洗對內部結垢(internal fouling)有較佳的處理效果。

以上諸位學者的研究成果中，之所以改變濾室中的流力狀態，不外乎是為了提升濾材表面上的剪應力(shear force)，希望藉由剪應力的提升來減緩結垢的產生。其中，掃流過濾乃是有效利用剪應力之特性，來達到提升濾速之分離程序。另外，在剪應力之研究中，Hoek et al.(2002)以模式推導膜幾何結構、剪應力大小與 RO 及 NF 結垢速率之關連，說明當膜孔道高度固定時，提高剪應力可減低膜結垢。在定流量之下，提高剪應力仍可減低膜結垢；而在定剪應力下，膜孔道高度對結垢影響不大。

流體由於壓力的驅動，造成分子之間的傳遞，而使流體流動。在分子傳遞的同時，會有作用力的產生，此時在作用面上會因流動方向不同，而產生正向作用力以及剪應力。在本研究中，主要探討在薄膜表面上的

剪應力變化情形，圖 2-2 為在薄膜表面上 x 方向各組成的受力變化情形，

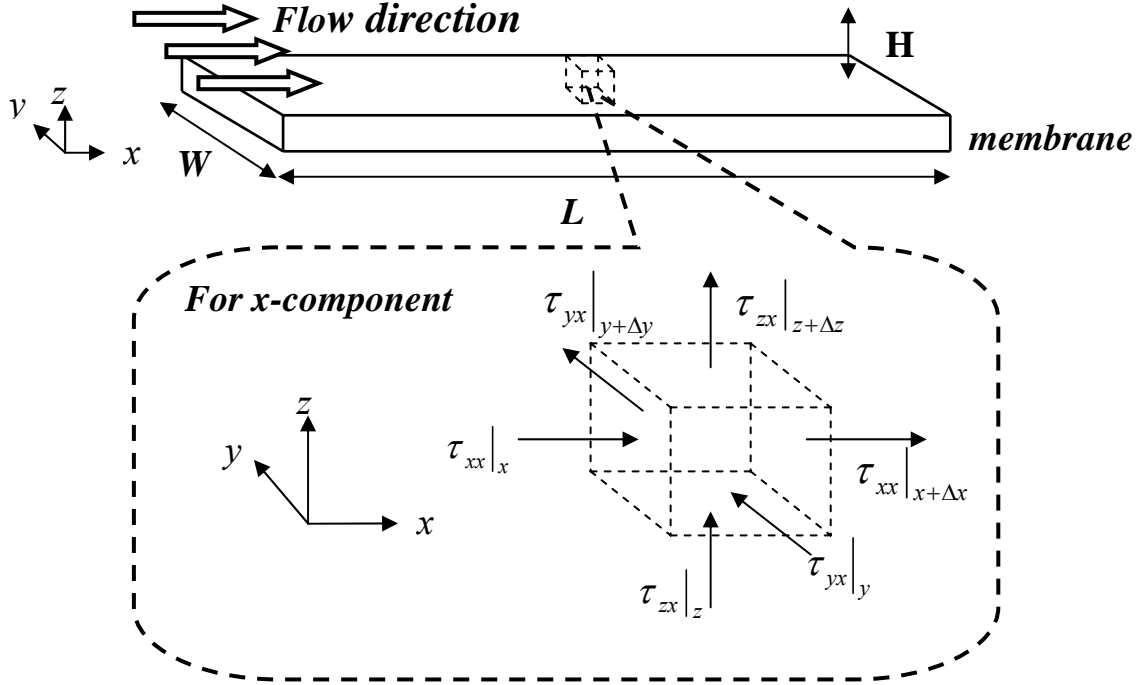


圖 2-2 膜面上 x 方向各組成的受力變化情形

由圖中可以看到，因流動方向的不同，所以在各作用面的作用力也有所不同。另外，在 y 方向以及 z 方向各組成的受力變化情形，如同以上的表示方式。因此，如需要得到膜面上的作用力大小，可由 Bird et al.(1960) 所提出在不同方向的正向力以及剪應力表示式求得，其表示式如下：

$$\tau_{xx} = -2\mu \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot \mathbf{v}) \quad (2.1)$$

$$\tau_{yy} = -2\mu \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot \mathbf{v}) \quad (2.2)$$

$$\tau_{zz} = -2\mu \frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot \mathbf{v}) \quad (2.3)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = -\mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) \quad (2.4)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = -\mu \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) \quad (2.5)$$

$$\tau_{zx} = \tau_{xz} = -\mu \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) \quad (2.6)$$

其中， μ 為流體黏度，式(2.1)~(2.3)為正向作用力(normal stress)，而式(2.4)~(2.6)為剪應力(shear stress)。本研究中流體為 x 方向流動，所以要計算膜面上 x 方向的作用力，其式子如下所示：

$$F_x = \int_0^H \int_0^W \left[-2\mu \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{v}) \right] dydz + \int_0^H \int_0^L \left[-\mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) \right] dx dz + \int_0^W \int_0^L \left[-\mu \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) \right] dx dy \quad (2.7)$$

其中， F_x 為 x 方向的作用力。由式(2.7)我們可以得到膜面上 x 方向的作用力大小，因此，提升 F_x 表示 x 方向的作用力增大，膜面上的剪應力值變大，相對的粒子不易堆積在膜面；反之，降低 F_x 表示 x 方向的作用力減少，膜面上的剪應力值變小，容易造成膜面上粒子的堆積。

2-2 粒子移動軌跡

在掃流過濾中，關於在膜面上粒子的移動軌跡之計算，要考慮到的因素相當複雜，因此，大部分薄膜系統的研究中，主要探討粒子在接近固體邊界移動時的相互作用，以及因流體力學變化而造成慣性提升的效應。例如 Vasseur and Cox(1976)；Segre and Silberberg(1962)；Drew et

al.(1991); Cox and Brenner(1968); Cox and Hsu (1977)等學者的研究。Frey and Schmitz(2000)探討掃流微過濾系統中，膜表面的粒子移動與粒子捕獲。指出了解在掃流微過濾中，懸浮粒子接近膜表面的行為模式，可以更加了解在膜表面第一層粒子是如何沈澱建立的。因而建立了 semi-analytical model，並提供了以下功用：

1. 此移動軌跡提供了簡單的模式去比較在各時間間距中，由邊界層元素法來計算 Stokes flow，而獲得完整的粒子移動模式。
2. 此簡單模式可近似的決定出，粒子到膜表面的移動軌跡情形，並獲得膜面粒子堆積的密度方程式。
3. 針對單一粒子及成對粒子的移動軌跡提供了完整的模式分析。

Kim and Zydney(2004)提出了靜電排斥力、流體力學拖曳力、以及布朗運動作用力對粒子移動軌跡的影響之各理論。接著 Kim and Zydney(2006)依據靜電排斥力、流體拖曳力、布朗擴散、慣性提昇力和凡得瓦爾力的各因素，理論分析在掃流過濾系統中粒子的二維運動軌跡。所使用的方程式如下(Kim and Zydney, 2006)：

$$m_p \frac{du_p}{dt} = 6\pi\mu a [K_p u_p - K_f u_f] + F_E + F_B + F_L + F_{VDW} \quad (2.8)$$

其中 u_p 為粒子的速度、 u_f 為流經粒子中心的流體速度、 a 為粒子半徑、 m_p 為粒子質量、 μ 為流體黏度。式(2.8)右手邊的第一項為作用在粒子上的流體力學拖曳力，其次依序為靜電作用力(F_E)、布朗運動作用力(F_B)、

慣性提升力(F_L)、以及凡得瓦爾力(F_{VDW})。 K_p 為對角線矩陣，主要表示流體作用力增加造成粒子與障礙物(系統邊界)之間的互相作用影響。 K_f 仍為對角線矩陣，主要表示流體作用力增加造成流體與障礙物(系統邊界)之間的互相作用影響。

粒子與薄膜之間的靜電作用力，可由下列方程式估計出來(Bowen et al., 1999)：

$$F_E = \frac{2\pi\kappa\epsilon_r\epsilon_0}{s_f} \left[\frac{2\psi_p\psi_m \exp(\kappa[h-a]) - (\psi_p^2 + \psi_m^2)}{\exp(2\kappa[h-a]) - 1} \right] \quad (2.9)$$

其中 κ 為德拜長度(Debye length)的倒數、 ϵ_0 為自由空間的介電常數、 ϵ_r 為誘電常數、 h 為粒子中心與固體表面之間的距離。 ψ_p 和 ψ_m 分別為粒子與薄膜的表面電位。參數 s_f 為空間因子，此因子與不同系統構造有所關聯(Kim and Zydney, 2004)。

布朗運動作用力則使用 Gaussian white noise process 模式(Kim and Zydney, 2004)：

$$F_B = \zeta \sqrt{\frac{27 \mu \sigma T}{\pi \rho^2 a^5 \Delta t}} \quad (2.10)$$

其中 σ 為 Stefan-Boltzmann 常數、 T 為絕對溫度、 ρ 為溶液密度、 Δt 為時間間距大小。參數 ζ 為 Gaussian 亂數。

在接近固體邊界上，球形粒子移動所受層流剪應力而形成的慣性提升力如下(Belfort et al., 1994)：

$$F_L = \frac{3\pi K_L \rho_f a^4 \gamma^2}{8} \quad (2.11)$$

其中 ρ_f 為流體密度(kg/m^3)、 γ 為膜表面上之剪應率(shear rate)($1/\text{sec}$)、 K_L 為到邊界之距離的無因次比值，即粒子到膜面之距離與邊界到膜面之比值。

在凡得瓦爾力的估計上，乃使用球體與平板之間的相互作用力表示式 (Elimelech et al., 1995)：

$$F_{\text{VDW}} = -\frac{Aa}{6h^2} \quad (2.12)$$

其中 h 為粒子中心到平板表面的距離、 A 為 Hamaker 常數($A \sim 10^{-21} \text{ J}$)。

2-3 濾速與阻力之探討

掃流過濾為相當廣泛地被使用在許多固液分離工業上的技術(Hwang et al., 2001; Cheng, 2002; Hwang and Liu, 2002; Hwang and Hseuh, 2003)。

粒子沈澱和阻塞為一般微過濾系統上的重要物理現象。在掃流過濾系統中的流體速度變化以及濾速變化，可由諸位研究學者之研究成果得知。

Singh and Laurence(1979)觀察出在多孔邊界上有滑移速度的效應，以及 Kleinstreuer and Paller(1983)研究出在軸向的位置有濾速的變化情形。

Romero and Davis(1990)應用掃流微過濾的理論模式來分析，粒子層增厚導致濾液通量的衰減之現象。Shopov and Lordanov(1994)提出 Stokes 方程

式中的壓力、剪應力及過濾邊界條件的數值演算法。在他們的研究成果中，提供了將 Dirichlet 邊界條件簡化的方法。Field et al.(1995)以定濾速方式進行微過濾，並探討其與膜結垢之關連，在特徵透膜壓力之下，幾乎沒有不可逆結垢現象(irreversible fouling)發生。Nassehi(1998)在微過濾系統中，利用 Darcy equation 解釋濾液通過濾面邊界時的 Navier-Stokes equations 傳送模式，進而建立 model。近來 Shin(2006)針對深床過濾中，改變粒徑大小、雷諾數大小、以及粒子的拖曳係數，作出粒子行為的模擬。Hwang 和他的研究同仁(Hwang and Cheng, 2003; Hwang et al., 2003; Hwang and Lin, 2005, Hwang et al., 2006)提出理論模式來預測掃流微過濾之擬穩態的濾速、濾餅厚度以及在雙成份懸浮液中的蛋白質阻隔係數。這些理論模式之建立乃基於基本的過濾方程式、粒子堆積的力平衡模式、濃度極化模式、和深床過濾中的標準粒子捕捉模式。Song and Tay(2006)探討長型流道的逆滲透膜過濾裝置，指出透過率可以藉由流道中的 downstream 驅動壓力之改變，而有明顯的變化。

2-3-1 濾速之預測

在掃流過濾中，任一懸浮粒子都有可能穩定地沈積在薄膜表面上，然而是否沈積則由施加在膜面上的外力而定。此外力包括了因流體流動造成的拖曳力、粒子之間的作用力、因慣性作用造成的提升力、粒子之間

的摩擦力以及重力。力平衡模式(Lu and Hwang, 1995; Hwang and Lin, 2002)可用來確認理想粒子在濾膜上的穩定狀態。當力平衡模式應用在微粒子之沈積時，拖曳力如果與摩擦力達平衡，此時微粒子可穩定的沈積在濾材表面上。如果粒子之粒徑相當小時，其粒子之間的作用力、慣性提升力、以及重力項可忽略不計，則力平衡模式可表示成(Lu and Hwang, 1995; Hwang and Lin, 2002b)：

$$F_t = f_c \cdot F_n \quad (2.13)$$

其中 f_c 為微粒子之間的摩擦係數， F_t 與 F_n 分別為施加在粒子上的切線方向拖曳力及正向拖曳力。關於座標的定義解釋如圖 2.3 所示，由圖中可以得到在兩平行平板(two-parallel-plate, TPP)系統中的層流正切流動之速度分佈(Lu and Ju,1989 ; Hwang et al.,1997 ; Hwang and Lin,2002b):

$$u_x = 6u_{s,0} \left[\left(\frac{y-L_c}{H-L_c} \right) - \left(\frac{y-L_c}{H-L_c} \right)^2 \right] \quad (2.14)$$

其中 $u_{s,0}$ 為初始的平均掃流速度， H 為乾淨濾材的雙平板系統之濾室高度， L_c 為濾餅厚度。

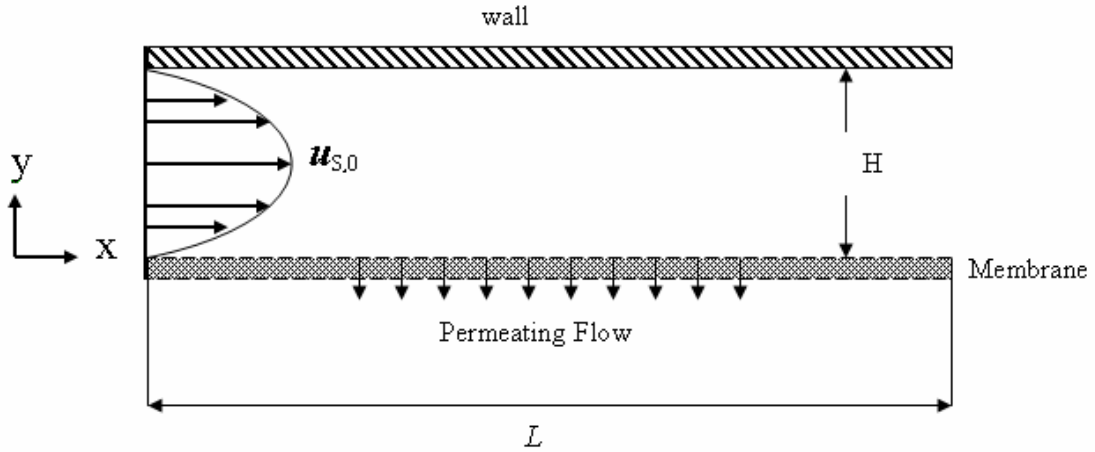


圖 2-3 平板式掃流過濾示意圖

已知切線方向的流動速度在接近薄膜表面時相當的低，因此可合理的假設在此區域的速度分佈為線性分佈。則切線方向的拖曳力可由 Stokes law 理論估計得到(Lu and Ju 1989 ; Belfort et al., 1994):

$$F_t = \frac{3}{4} \pi \mu d_p^2 \gamma_0 C_1 \quad (2.15)$$

其中 μ 為流體的黏度， d_p 為微粒子的粒徑， γ_0 為膜面上的剪應率(shear rate)， C_1 為視當時濾餅情形的修正因子。在膜面上的剪應率可由式(2.14)估計得到：

$$\gamma_0 = \left. \frac{du_x}{dy} \right|_{y=l_c} = \frac{6u_{s,0}}{H - L_c} \quad (2.16)$$

大部份的過濾系統中，在過濾方向的雷諾數相當的小，因此正向拖曳

力可由修正的 stokes law 估計得到：

$$F_n = 3\pi\mu d_p q_s C_2 \quad (2.17)$$

其中 q_s 為擬穩態濾速， C_2 為修正因子。因此，將式(2.15)(2.17)代入式(2.13)，整理可得到擬穩態的濾速值：

$$q_s = C_3 \frac{d_p \gamma_0}{f_c} \quad (2.18)$$

在微粒子的懸浮液中，其粒子大小和摩擦係數均為定值，因此式(2.18)可改寫成：

$$q_s = C_4 \cdot \gamma_0 \quad (2.19)$$

此方程式表示在膜面上濾速與剪應率之間呈現線性的關係，將式(2.16)代入式(2.19)中得到：

$$q_s = C_5 \frac{u_{s,0}}{H - L_c} \quad (2.20)$$

其中 C_5 為經驗係數。其方程式表示在非常薄的濾餅狀態下，擬穩態濾速與掃流速度呈現線性關係。

2-3-2 過濾之阻力分析

過濾程序中，對濾速的計算預測是必要的，然而，過濾阻力最直接影響到的就是濾速的變化，而與過濾阻力最有相關的乃是在膜面上的濾餅層。在過濾阻塞的探討中，粒子在膜面上堆積，逐漸造成阻力，其阻力示意圖，如圖 2.4 所示。而利用 Darcy's Law 阻力(Resistance)推算出，過濾的基本公式如下：

$$q = \frac{1}{A} \frac{dV}{dt} = \frac{\Delta P}{\mu R_t} = \frac{\Delta P}{\mu(R_m + R_{if} + R_{cp} + R_c)} \quad (2.21)$$

$$R_c = \alpha_{av} W_c \quad (2.22)$$

其中

q ：過濾的濾速 ($m^3 / m^2 \cdot sec$)

A ：薄膜的過濾面積 (m^2)

V ：濾液總體積 (m^3)

t ：過濾時間 (sec)

ΔP ：過濾壓差 (N / m^2)

μ ：流體之黏度 ($kg / m \cdot sec$)

R_t ：總過濾阻力 ($1/m$)

R_m ：乾淨薄膜之阻力 ($1/m$)

R_{if} ：薄膜內部阻塞之阻力 ($1/m$)

R_c : 濾餅阻力 ($1/m$)

R_{cp} : 濃度極化所造成之阻力 ($1/m$)

W_c : 單位濾材面積上的濾餅重 (kg/m^2)

α_{av} : 平均過濾比阻 (m/kg)

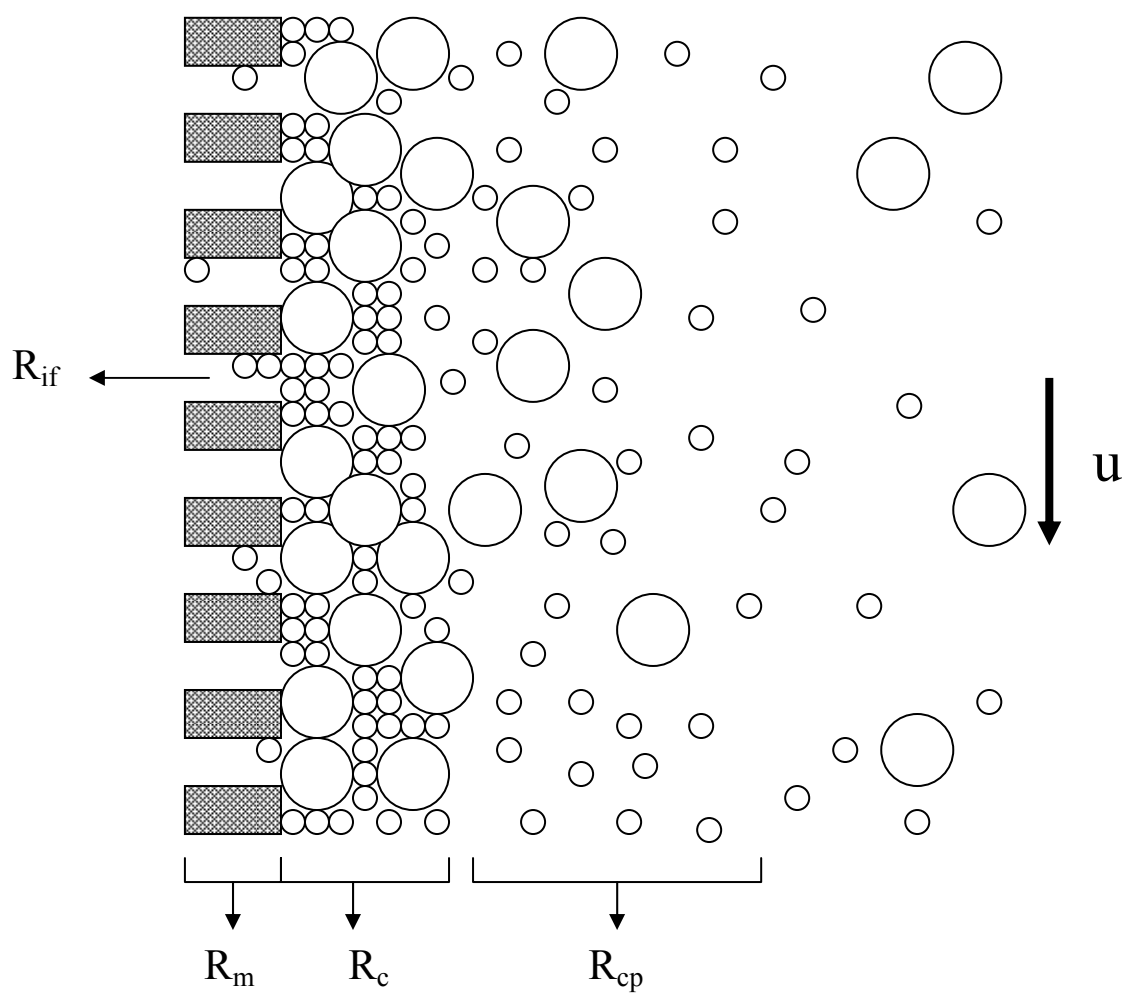


圖 2-4 微過濾之阻力示意圖

在過濾當中可以利用此式子來做濾速的預測，因此已知各阻力值即可

得到濾速值。然而，依據式(2.20)及(2.21)，控制掃流速度及過濾壓差，則可求得濾餅厚度與濾速之間的關係式。

2-4 過濾阻塞機制之研究

在過濾過程中，會因為懸浮粒子、膜材種類不同及操作條件的不同，造成粒子在濾材上的累積方式也有所不同，另外，粒子在濾材上的過濾機制也會隨過濾時間而逐漸改變。由於粒子與粒子及粒子與膜材之間的吸附作用，因此造成堆積而產生阻力，所以如果能了解其中的原理，相信對濾速的增加必定有所幫助。Hermans and Bredee(1936)根據粒子堆積在濾材上或阻塞於濾材孔道內的不同現象，加以描述說明，其阻塞情形如圖 2-5 所示，其中阻塞模式可以細分為：

<1> 標準阻塞模式(Standard blocking model)(SBM)

粒子粒徑遠小於濾材孔徑時，粒子會隨著濾液進入孔洞中，附著於孔壁上堵塞孔道，使得孔道變小而增加過濾阻力。

<2> 完全阻塞模式(complete blocking model)(CBM)

粒子粒徑大於濾材孔徑時，粒子會完全堵住濾材孔口，使得濾材可供過濾的孔道減少，而使濾速降低。

<3> 中間阻塞模式(Intermediate blocking model)(IBM)

當泥漿濃度稍微提高時，因粒子較多，除了堵塞孔口內部之外，還會

堵塞孔洞進而在上面堆疊，在濾材上形成一堆積粒子層，使能過濾的膜面積減少而造成濾速衰減。

<4> 濾餅過濾阻塞模式(Cake filtration model)(CFM)

當泥漿中粒子濃度更高時，粒子堆積層完全覆蓋膜面，累積而形成濾餅，此時過濾阻力主要是來自於濾餅。

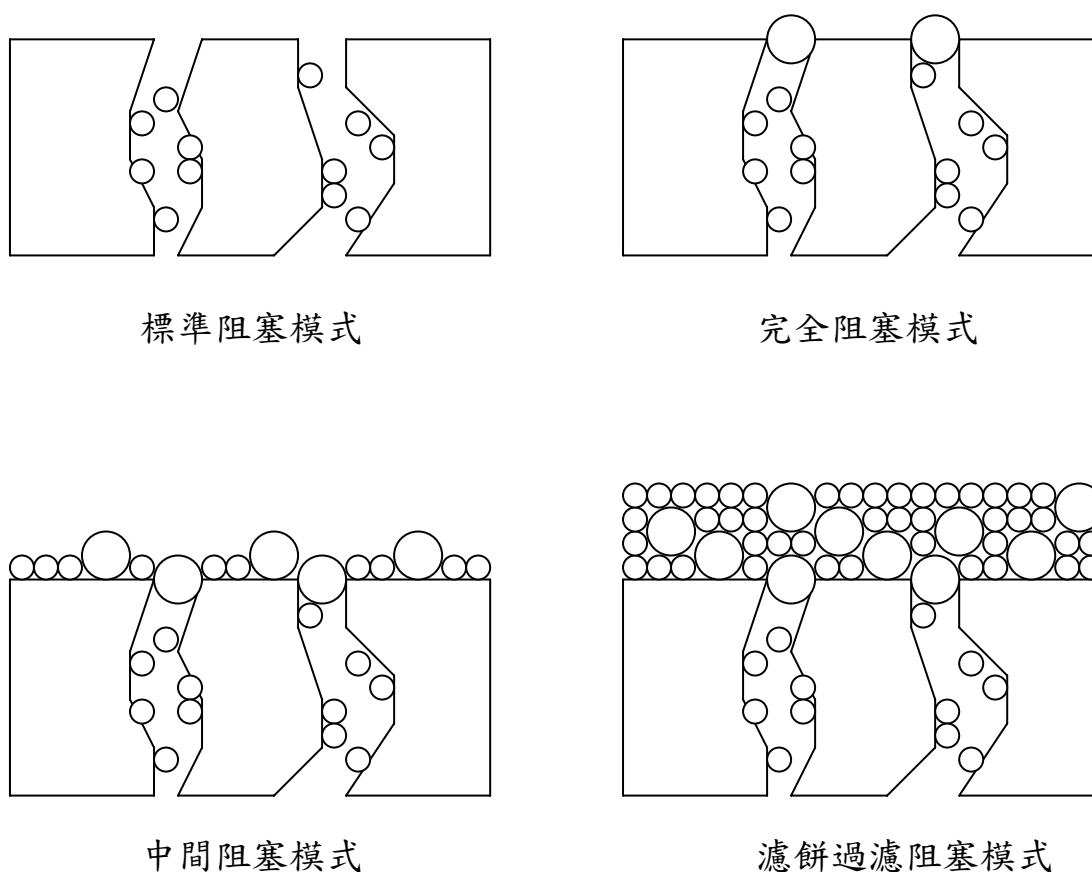


圖 2-5 四種阻塞模式示意圖

Tiller and Green(1973)觀察出在薄膜表面上有一表皮層的結構。此表

皮層之厚度約為濾餅整體之20%。並且，指出此表皮層之過濾阻力，幾乎為整體濾餅之阻力。在一般的過濾過程中，最初泥漿中的小粒子會以標準阻塞的形式阻塞濾材之孔道。然後較大的粒子開始阻塞孔道口。假使泥漿之濃度較高，則會改為中間阻塞，一旦粒子層形成，則將進行濾餅過濾。因此Hermia(1982)以式(2.23)來表示濾液接收體積與過濾時間的關係：

$$\frac{d^2t}{dV^2} = K \left(\frac{dt}{dV} \right)^n \quad (2.23)$$

其中K為比例常數，會隨機構的不同而有不同的表示法；n則為不同阻塞機構時的指標。當n=2時，表示完全阻塞，此時V對exp(t)作圖為線性關係；n=1.5時為標準阻塞，此時t/V對t作圖為線性關係；n=1時為中間阻塞，此時V對ln(t)作圖為線性關係；n=0則為濾餅過濾，此時t/V對V作圖為線性關係。

另外，Nakanishi et al.(1987)與 Tanaka et al.(1994)研究比較微小有機粒子與乳膠粒子之間的濾餅型態之差異，並且比較兩者因濾餅生成而產生的過濾比阻。他們研究得到微小有機粒子的濾餅型態和過濾比阻，與過濾壓差之間有相當大的關聯。Kuberkar and Davis(2001)針對動態膜造成濾速衰減之阻塞模式作探討。近來Vrouwenvelder et al.(2006)發展出Membrane Fouling Simulator(MFS)系統來確認薄膜的阻塞。

然而事實上造成阻塞的原因相當多，包括了分子的親疏水性、薄膜的特性(膜與懸浮物質之間的吸附)、自然有機物交互作用及靜電作用力等。

如果以水力清洗膜面來做阻塞的區分的話：阻塞一般可區分為二類：

(1) 可逆阻塞

(2) 不可逆阻塞

可逆阻塞是指可經由水力方式去除膜面上的結垢阻塞；而不可逆阻塞是指經由水力沖洗後仍然不能恢復的阻塞。因此要得到高濾速的過濾程序不單要了解粒子的堆積模式，也要了解各物理性質、化學性質、與各物質之間的作用力，這樣才能減少過濾阻塞的情形發生。

2-4-1 濃度極化現象

所謂的濃度極化(圖 2.2)是指在過濾程序中，當進料流經薄膜表面時，進料中的顆粒被帶往薄膜表面，由於薄膜有阻擋的作用，所以在顆粒不停累積的情況下，靠近膜面處的濃度逐漸增加，形成一層濃度邊界層。又因為膜面上的濃度較大，使得進料中的液體透過薄膜表面的量漸減，直至薄膜的濾液量與膜面上累積的顆粒因為質傳現象而回到流體中的量達到動態平衡。因此，濃度極化現象之研究，大部分都與薄膜理論有關。Zydney and Colton(1986)根據薄膜理論推導出，濃度邊界層之厚度只與粒子的粒徑與過濾時間有關，而與剪應力大小無關；Schulz and

Ripperger(1989)採用薄膜理論與 Stokes-Einstein 理論模式說明：濃度極化中的粒子逆擴散現象完全是流體力學所造成，而非因為濃度差所引起；Davis and Birdsell(1987)於流體為穩態、層流、全展流與牛頓流體的假設下，以粒子在掃流過濾之穩態濃度極化邊界層，以對流擴散方程式解得一可預測穩定濾速之近似解。

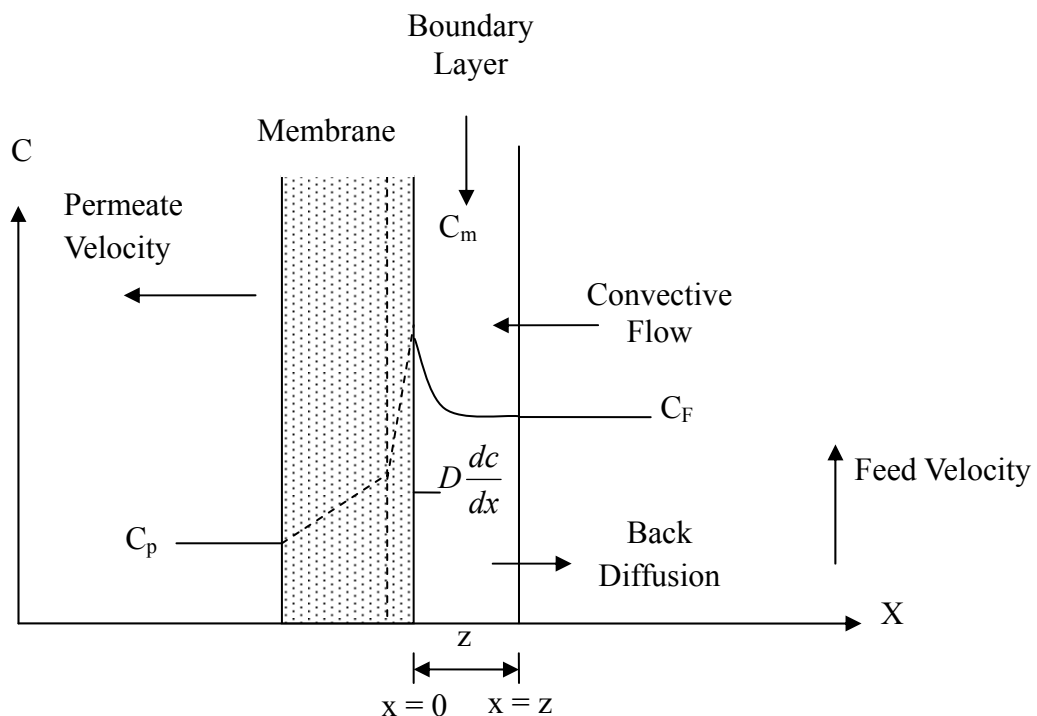


圖 2-6 濃度極化分布圖 (Bader, 2006)

濃度極化除了會有濾液量衰減的問題外，進料中的顆粒與薄膜附著也容易使得薄膜材料變質，影響分離效果。不過，雖然濃度極化現象會使得濾液量衰減，但只要利用掃流過濾方式，則可藉由水力去除積垢

(Adham et al., 1993)，達到減低濃度極化的效果，對於解決濾液量衰減的問題是一大幫助。

由於濃度極化與結垢現象直接的影響過濾的效果，所以為了克服這些問題，研究者相繼提出許多相關的改良方式。Field et al.(1995)提出，結垢機制隨懸浮液中物種不同而有所差異，對於較大顆粒而言，只要濾速維持在某個限值以下，結垢現象就不會發生；Ahn et al.(1998)發現可藉由降低 pH 減少濃度極化；Schwingea et al.(2000)在不同掃流速度下進行擾流，發現有助於減少濃度極化的發生，且每單位體積所生產之濾液量可節省 60% 的成本。清洗的方式可分為物理清洗與化學清洗，前者適用於處理阻塞現象；後者可以用來處理吸附與膠聚的情況 (Blatt et al., 1970)，但缺點在於化學清洗可能會破壞薄膜的結構。針對物理與化學兩種清洗方法，分別說明如下：

物理方法：首先，在濾液端施加壓力，再讓濾液由濾液端進入濾室中，沖刷掉累積在膜面中的顆粒，此種方法稱為：「反洗」(Rodgers and Sparks, 1991)，如圖 2-7 所示。

化學方法：主要是將薄膜濾面浸泡在 HCl、NaCl、NaClO 等溶液中，並且放置在超音波震盪機內隔水震盪 30 min。常用的薄膜清洗溶劑與其用途，如表 2.1 所示。

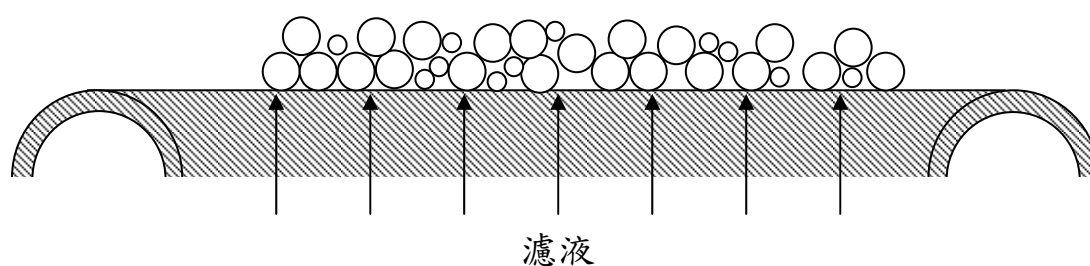


圖 2-7 反洗操作圖

表 2.1 常用薄膜清洗溶劑與用途(蕭瑞昌,1997)

常用之薄膜清洗溶劑與用途	
溶劑	用途
酸性清洗劑(檸檬酸、硫酸、磷酸、草酸、鹽酸等)	去除膜面上之碳酸鈣、磷酸鈣、金屬氧化物等礦物性結垢。
鹼性清洗劑(碳酸鹽、磷酸鹽、氫氧化物等)	去除沉積在膜面上的有機物。
螯合劑型(EDTA、NTA、葡萄糖酸等)	EDTA、NTA 有去除鈣沉積物的效果；葡萄糖酸則適用於鐵的沉積物。
微生物性(消毒殺菌劑、生物殺菌劑、生物分散劑等)	消毒殺菌劑、生物殺菌劑可殺死微生物；生物分散劑則可去除細菌與生物膜。

第三章 實驗方法

3-1 實驗物料與濾膜之種類

實驗所使用的粉體為聚甲基丙烯酸甲酯 (polymethyl methacrylate, PMMA)，此粉體由日本 Soken Chemical & Engineering Co., Ltd. 所生產，其產品型號為 MP-1600，粉體的外觀為白色粉末，然而，經由掃描式電子顯微鏡(SEM)觀察其形狀接近球形，如圖 3-1 所示。粉體的粒徑為 $0.8\ \mu\text{m}$ ，含水率為 0.5 %，粒子密度(ρ_p)為 $1190\ \text{kg/m}^3$ 。

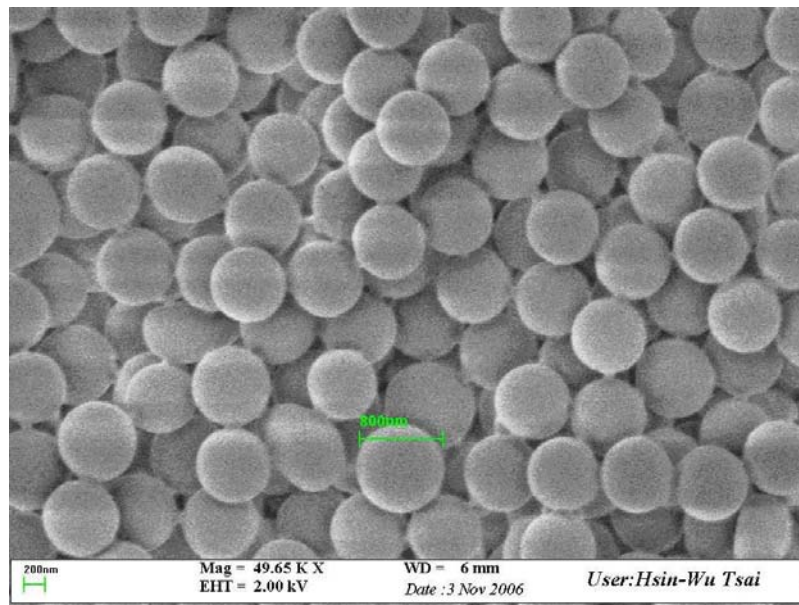


圖 3-1 PMMA 粉體的 SEM 照片($\times 49.65\text{K}$)

過濾所使用的濾膜為 ADVANTEC MFS, Inc. 所生產的，型號為 A010A142C。如圖 3-2 與圖 3-3 所示，材質為 Mixed cellulose ester，乃親水性濾膜，其最高操作溫度為 55°C，平均孔徑為 0.1 μm ，孔隙度約為 74%，濾膜厚度為 125 μm ，濾膜直徑為 142 mm。

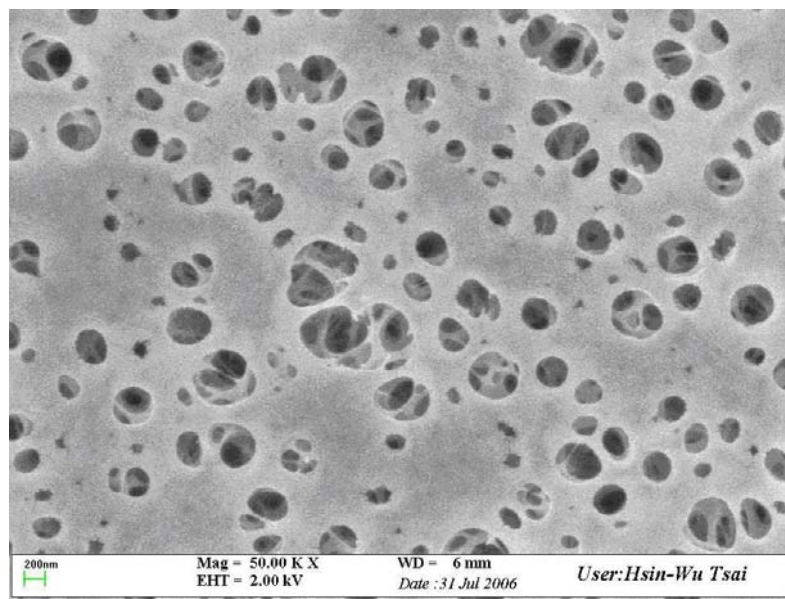


圖 3-2 Mixed cellulose ester membrane 的正面 SEM 圖($\times 50\text{K}$)

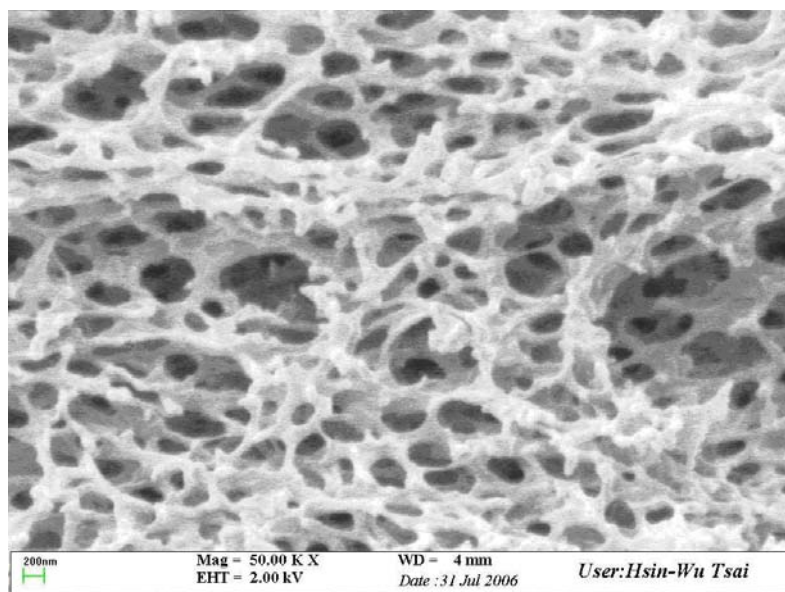


圖 3-3 Mixed cellulose ester membrane 的剖面側視 SEM 圖($\times 50\text{K}$)

3-2 掃流過濾實驗裝置

3-2-1 掃流過濾基本構造

實驗所使用的是平行板式掃流微過濾裝置，其掃流過濾基本系統的拍攝圖，如圖 3-4 所示。

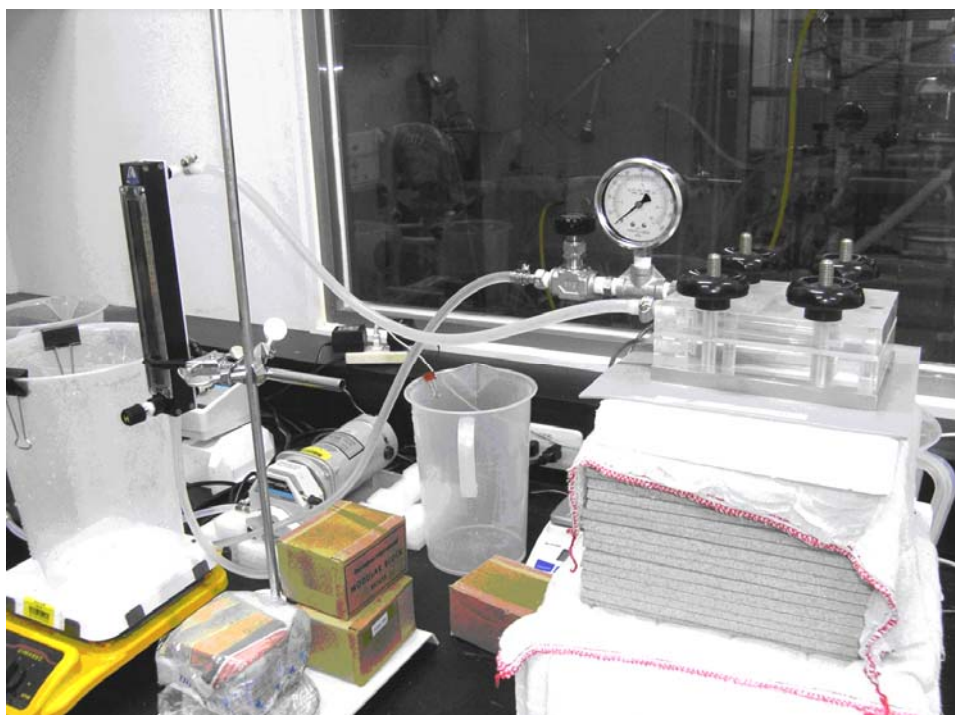


圖 3-4 掃流過濾基本系統拍攝圖

另外，圖 3-5 為掃流過濾基本系統之示意圖，在操作流程上，為操作實驗前預先配好懸浮溶液，把輸送 pump (Masterflex® model 7518-00)打開，將懸浮溶液經循環系統輸送至濾室中，調整浮子流量計(Rotameter)來控制濾室中的掃流速度，懸浮溶液經濾室再通過壓力計及針閥而回流至原懸浮溶液槽中，調整針閥控制回流的量進而控制過濾壓差，然而經由濾室透過濾膜的澄清濾液，由收集容器經電子秤

(Precisa BJ 8100D)讀出重量，電子秤與個人電腦連線，則電腦會自動記錄電子秤上的重量數據。過濾一段時間後，等待濾速穩定而不再改變，便可將實驗停止，將濾液取出做後續分析，或將在裝置中濾膜上的濾餅取出秤重(Precisa XS 225A)，做進一步的分析探討。

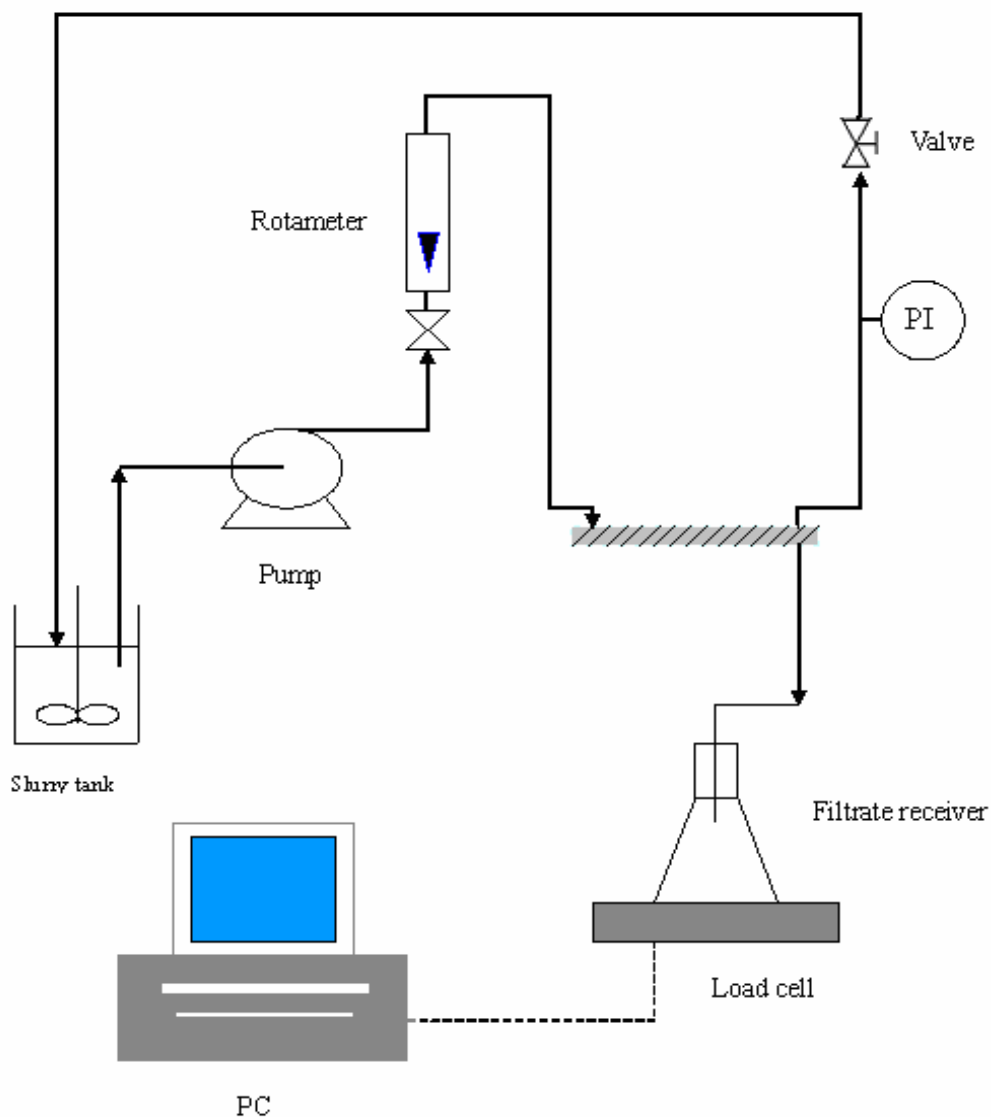


圖 3-5 掃流過濾基本系統之示意圖

掃流過濾模組由上下兩平板壓克力所構成的，以及過濾的濾室是以厚度為 3×10^{-3} m、長度為 5.5×10^{-2} m 及寬度為 2.0×10^{-2} m 之矽膠墊片所構成，如圖 3-6 所示，因此，過濾面積為 1.1×10^{-3} m²。

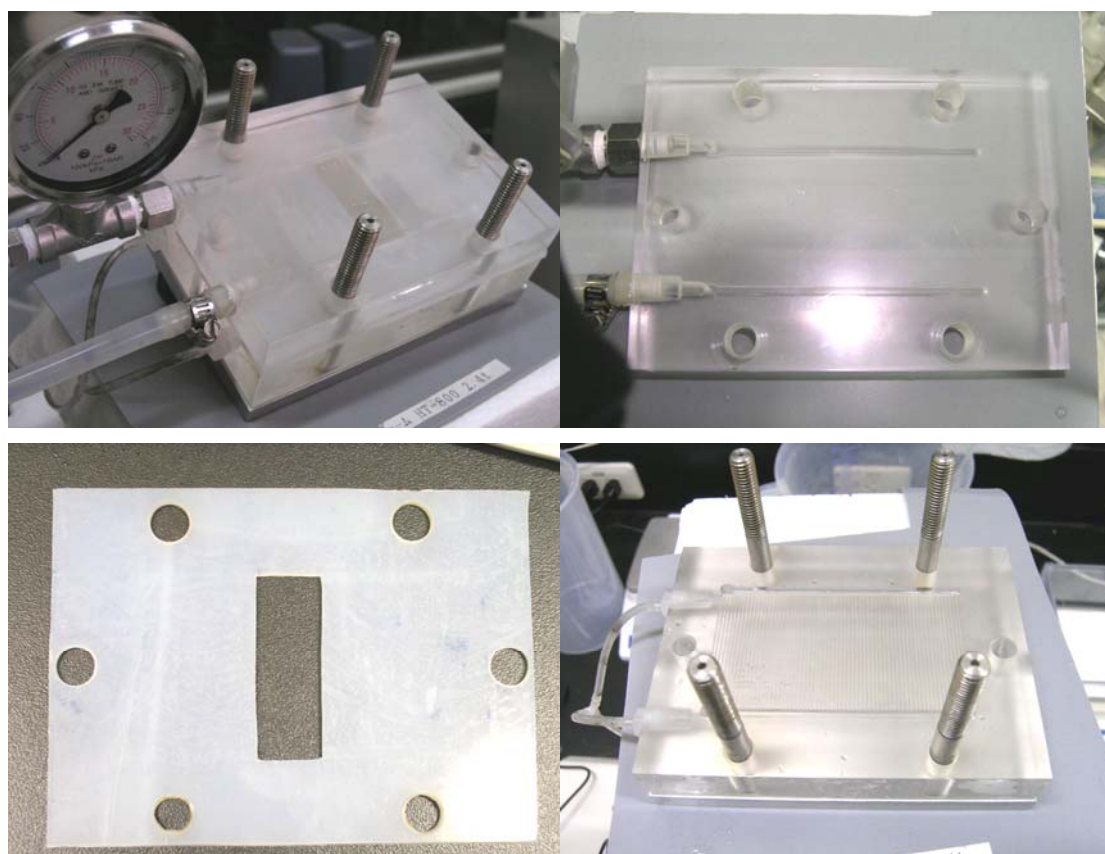


圖 3-6 掃流過濾基本系統模組之構造圖

3-2-2 有側流之掃流過濾構造

由於膜面上的流力變化，相對的會影響濾餅之生成。在本研究中，乃設法改變膜面上的流力情形，以增加膜面的剪應力大小，進而減少濾餅的生成。因此，針對原有掃流過濾的基本構造加以改良，將原先濾室的側邊引入另一道物流，其側端物流以 60° 夾角進入濾室當

中，如圖 3-7 所示。

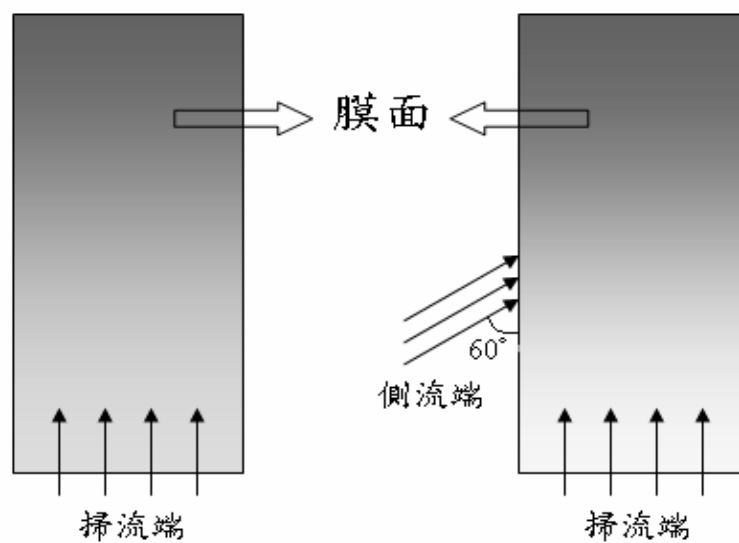


圖 3-7 基本掃流與有側流之進料方式示意圖

在有側流之掃流過濾構造當中，明顯的可以看出濾室有兩道物流進入，其有側流之掃流過濾系統拍攝圖，如圖 3-8 所示，

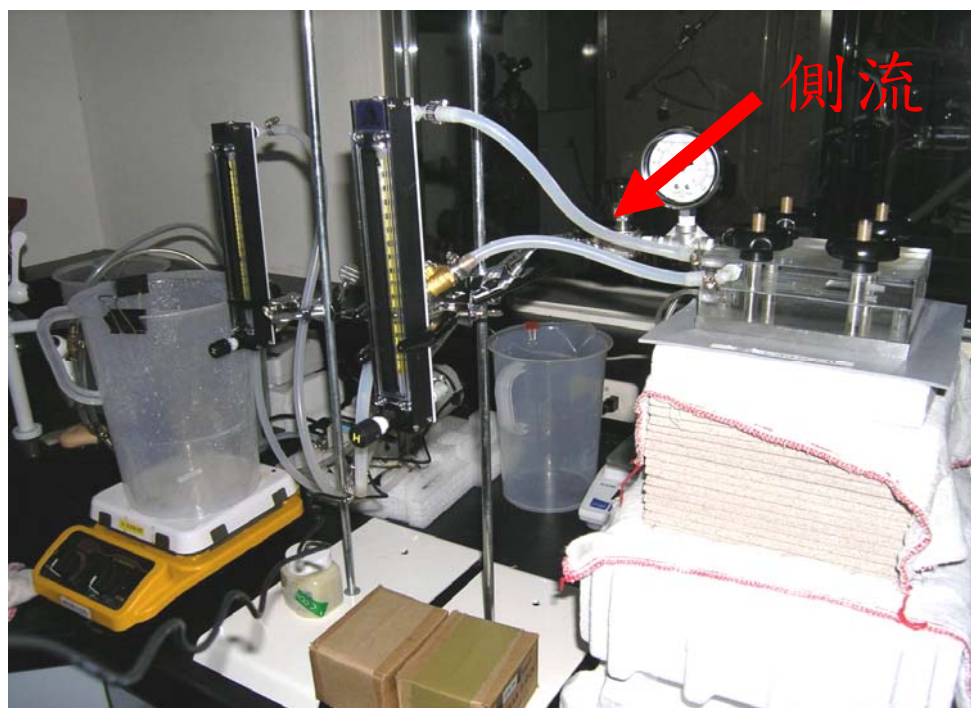


圖 3-8 有側流之掃流過濾系統拍攝圖

以及圖 3-9 為有側流之掃流過濾系統示意圖。

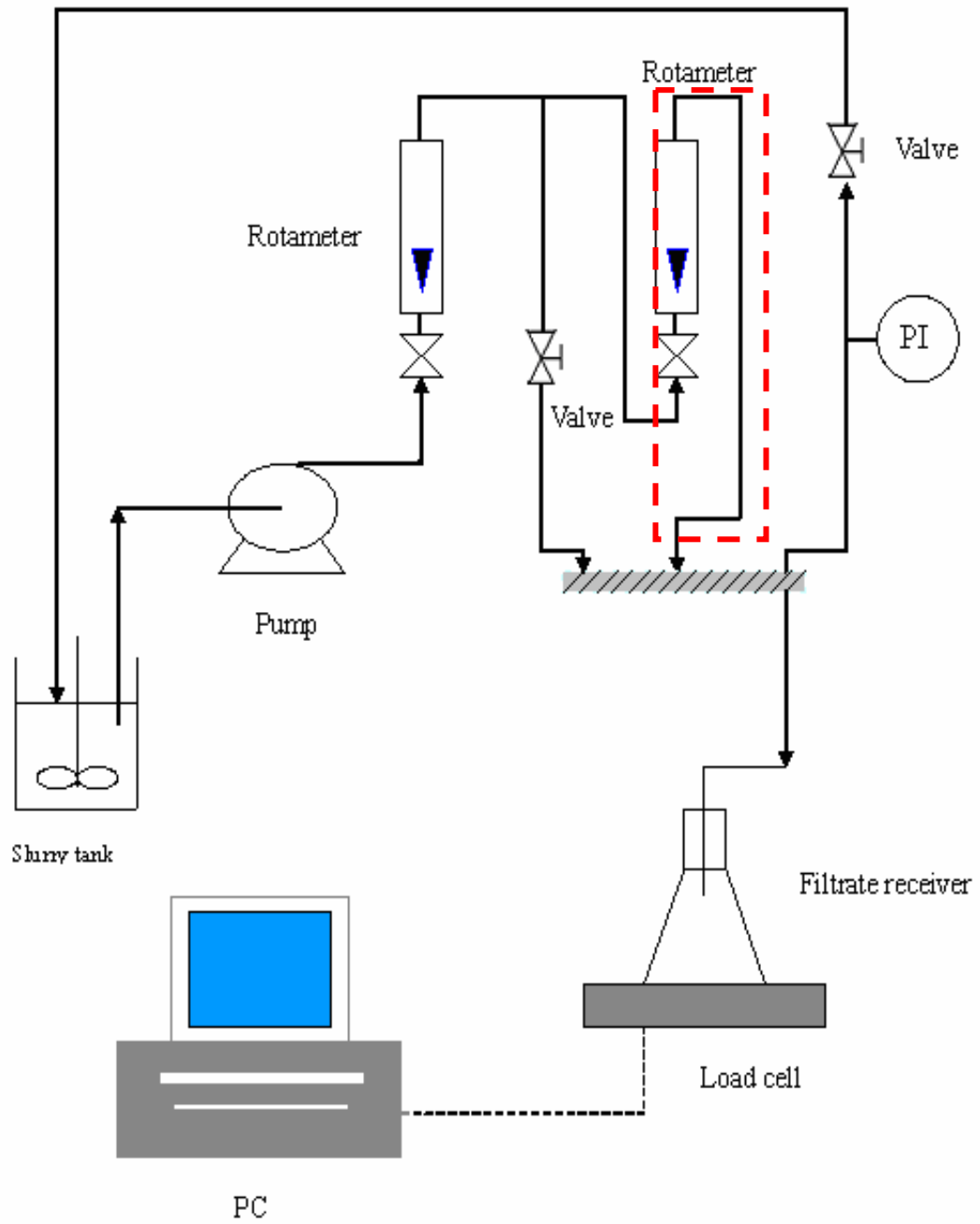


圖 3-9 有側流之掃流過濾系統示意圖

另外，在濾室的比例大小上，與基本構造相同，過濾面積仍為 $1.1 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ 。唯有在側端多了一物流進口，其進口截面積為 $3 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ ，如圖 3-10 所示。在實驗流程上，大致與基本構造相同，唯有在懸浮液的輸送上，由一股物流分作為兩股物流，則因不同操作條件加以調整流量計與閥件，來控制流量多寡。

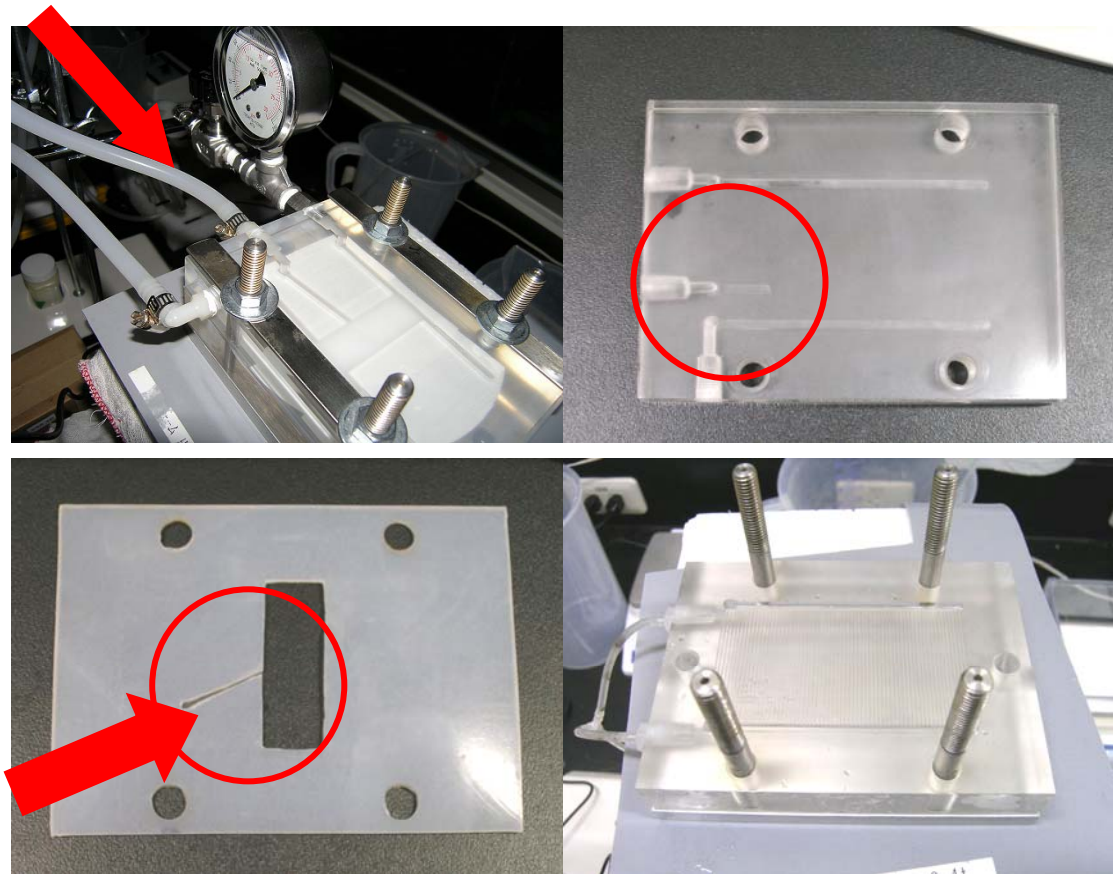


圖 3-10 有側流之掃流過濾系統模組構造圖

3-3 實驗步驟

1. 先將預配製已知重量百分濃度的 PMMA 懸浮溶液置於儲槽中，利用攪拌器將懸浮液均勻攪拌，使 PMMA 粉體均勻的分散在槽中。
另外，將乾淨乾燥的濾膜做秤重的動作，紀錄重量，隨後將浸濕的濾膜再次秤重，紀錄重量。
2. 在操作前先使用清水、蒸餾水，運作在過濾系統中，將系統中的空氣排出，並且將內部清洗乾淨，避免實驗之誤差。
3. 將完全浸溼的薄膜放置過濾模組壓克力上，墊上矽膠墊片，將上層壓克力裝設好，利用器具將模組裝設好，預防有滲漏的情形發生。
4. 開啟 pump 電源，將懸浮液輸送至過濾膜組中，調整流量計與針閥，來控制掃流速度與過濾操作壓差。並將回流管拉至儲槽中。
5. 開啟電腦之天平接收軟體，開始進行實驗。觀察所接收的濾液重數據，然而，儲槽中會因過濾的濾液被收集，而造成槽中的懸浮液量減少，使濃度有所改變，因此，在過濾期間要隨時補充等量的蒸餾水，而維持原實驗濃度。
6. 觀察濾液值，等待濾液值在長時間下維持一定值，此時即可停止實驗，將模組拆卸，並且取出模組上的濾膜及濾餅，將其秤重然後放置烘箱烘乾，等待烘乾的濾膜與濾餅，再做秤重的步驟。

7. 改變不同的操作條件，然後重複以上各步驟，如表 3-1 所示。(側流的進料比例，如表 3-2 及圖 3-7 所示)。

表 3-1 操作條件整理表

掃流速度 (m/sec)	0.1~0.3
操作壓力差 (N/m ²)	$2.5 \times 10^4 \sim 7.5 \times 10^4$ (25 kPa~75 kPa)
操作溫度 (°C)	20
進料濃度 (wt%)	0.1~0.3
pH 值	7

表 3-2 調整掃流端與側流端之進料量各種比例條件

掃流端 (g/sec)	側流端 (side-stream) (g/sec)
6	0
6	0.6
6	3
6	6
12	0

3-4 管式膜實驗與濾膜

本實驗以不同掃流速度與不同過濾壓差進行掃流過濾實驗，探討不同操作條件下的濾速衰退情形，以及濾膜阻力之變化。並且，針對提高濾速方法之研究採用於系統中增加一側流，以及伴隨著反洗進行的過濾操作之探討。

在濾材方面，則使用 TAMI 所生產的複合陶瓷膜。其規格、尺寸，與適用條件，如表 3-3 所示。

表 3-3 複合陶瓷膜之性質

Maximum pressure	10 bar
Operating pH range	0~14
Maximum temperature	80°C
Average pore size	3.5 μm
Membrane Material	$\text{ZrO}_2\text{-TiO}_2/\text{Carbon}$
Pore size	0.45 μm
Length	600 mm
Surface area	0.011 m^2

3-5 實驗裝置

3-5-1 管式膜過濾基本構造

實驗所使用的是管式膜過濾裝置，此裝置的示意圖，如圖 3-11 所示。另外，圖 3-12 為管式膜過濾系統之實際拍攝圖。

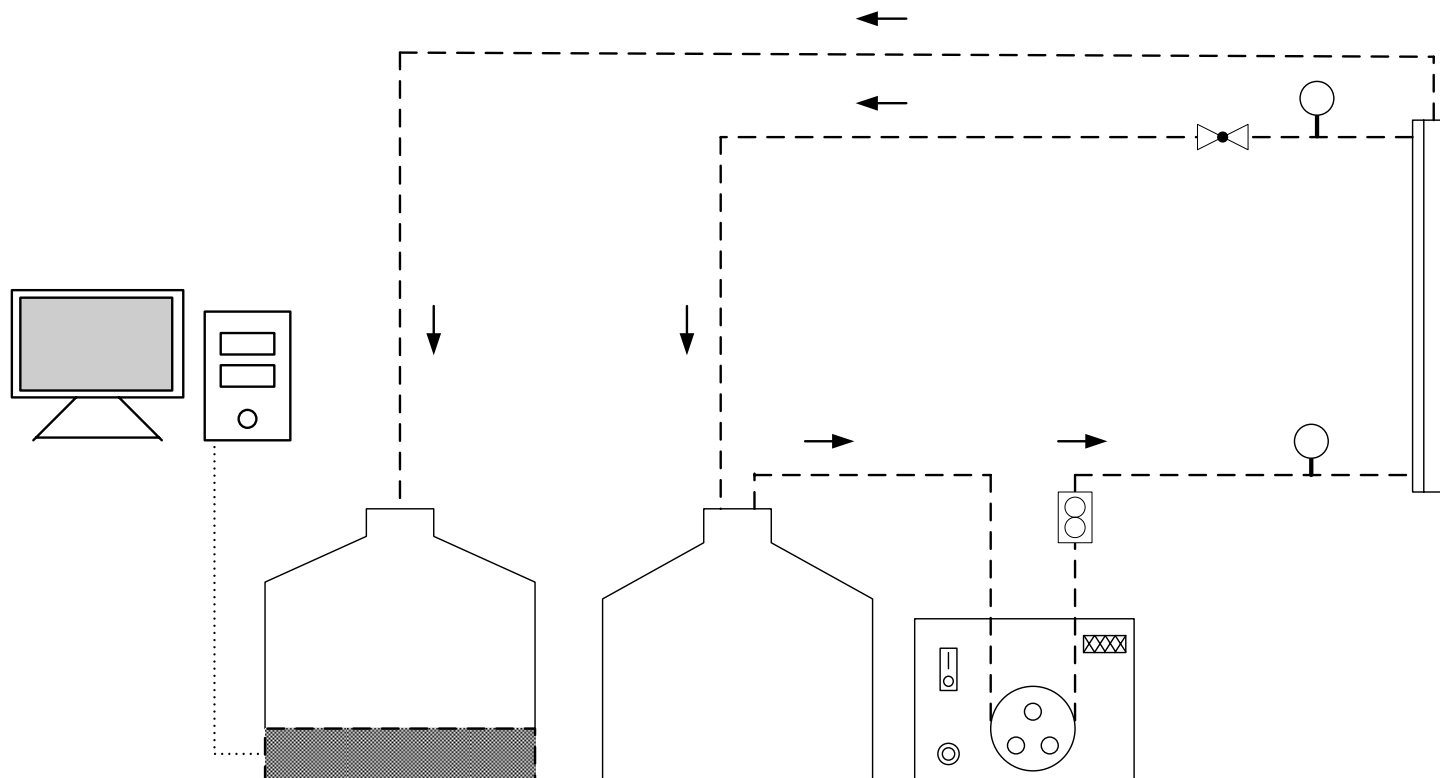


圖 3-11 管式膜過濾基本系統之示意圖

C-1



圖 3-12 管式膜過濾基本系統拍攝圖

在操作流程上，實驗前，使用四位數天平秤量 PMMA 與去離子水配製所需濃度之懸浮液，配製好的懸浮液置於磁石攪拌器上作固定轉速攪拌，以達到均勻分散的目的。實驗時，把蠕動式幫泵(PP-1)打開，將懸浮溶液經循環系統輸送至濾室中，調整幫泵(PP-1)的轉速來控制濾室中的掃流速度。懸浮液流至過濾模組後，經過濾後之濃縮液會通過針閥(V-1)與壓力計(P-1)，再回流至攪拌槽(B-2)中，在此針閥(P-2)是用來控制過濾壓差。經由濾室透過濾膜的澄清濾液，由收集容器經電子秤(W-1)讀出重量，電子秤與個人電腦(C-1)連線，則電腦會自動記錄電子秤上的重量數據。過濾一段時間後，待濾速穩定而不再改變，即可將實驗停止。

3-5-2 外加側流之管式膜過濾構造

由於濾室中的流體流動情形，會影響濾餅之生成。所以，在本研究中，外加側流之管式膜過濾構造是將原管式膜過濾基本構造中，殼管側 15 cm 處增加一側邊進流端，其側流端物流以垂直方向進入濾室當中(圖 4.4)，試圖增加膜面上的剪應力，進而減少濾餅的生成。

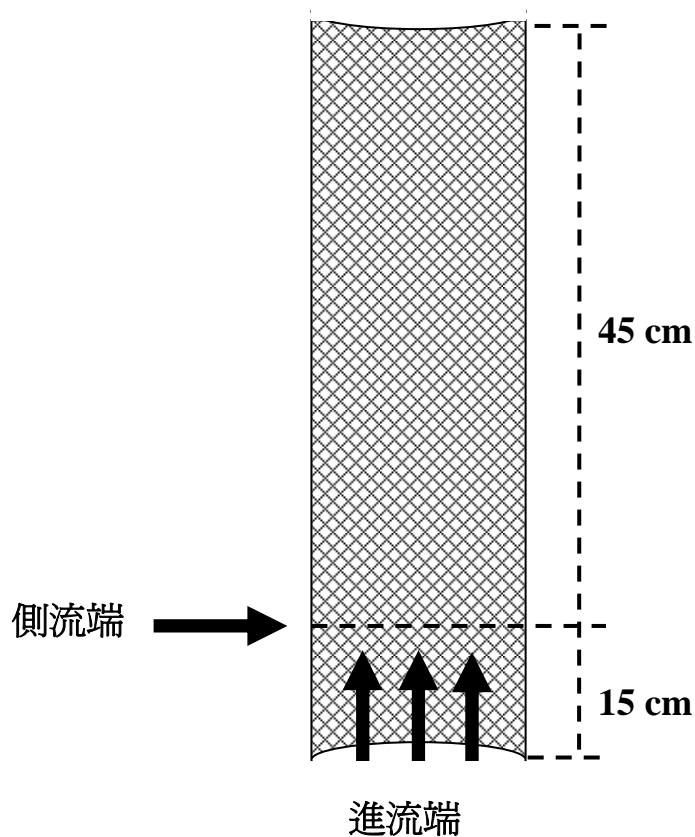


圖 3-13 外加側流之進流方式示意圖

由圖 3-13 可明顯發現有兩支流進入濾室中，其外加側流之管式膜過濾系統拍攝圖，如圖 3-14 所示。另外，圖 3-15 為外加側流之管式膜過濾系統之示意圖。

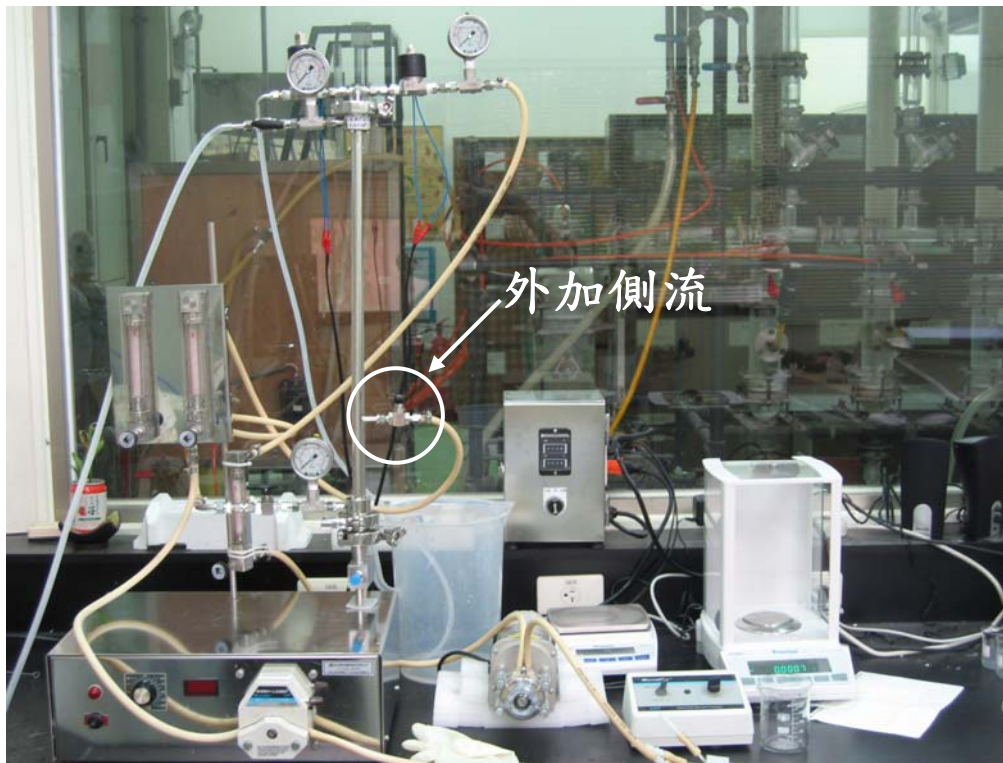


圖 3-14 外加側流之管式膜過濾基本系統拍攝

在操作流程上，大致與管式膜過濾相同，唯實驗時需要調整幫泵(PP-1)的轉速來控制進料量，再同時調整針閥(V-2)與針閥(V-3)，來控制濾室中的掃流速度與側流速度之比例。

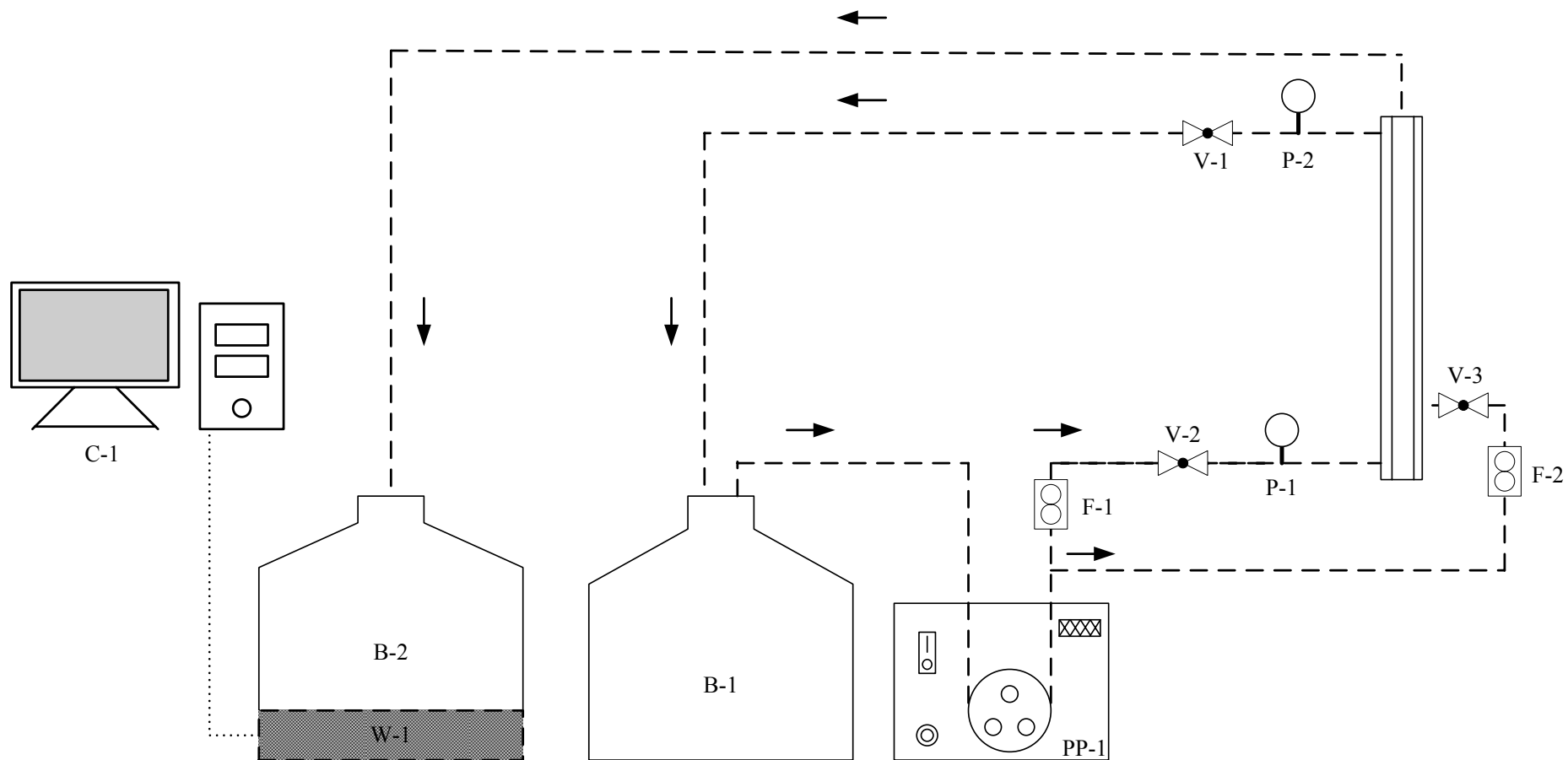


圖 3-15 外加側流之管式膜過濾基本系統之示意圖

3-5-3 間歇性反洗操作之管式膜過濾(Case-1)基本構造：

間歇性反洗操作之管式膜過濾(Case-1)構造是在原管式膜過濾基本構造中，加入定時控制器(CON-1)來控制電磁閥(CV-1& CV-2)，使過濾暫停，濾液能夠進入膜管中進行反洗操作。圖 4.7 為間歇性反洗操作(Case-1)之管式膜過濾基本系統之示意圖。

在操作流程上，大致與管式膜過濾相同，唯實驗前需要先設定定時控制器。本實驗之定時控制器設定為：過濾 600s 後，再進行反洗 30s，重複循環操作至到達恆定濾速為止。

3-5-4 間歇性反洗操作之管式膜過濾(Case-2)基本構造：

間歇性反洗操作之管式膜過濾(Case-2)構造大致與間歇性反洗操作之管式膜過濾(Case-1)構造相同，唯一差異僅在於間歇性反洗操作之管式膜過濾(Case-1)採用管式膜過濾時的殼管，而間歇性反洗操作之管式膜過濾(Case-2)則是採用外加側流之管式膜過濾時的殼管，即殼管側 15 cm 處多了一側邊出口。

在操作流程上，除了在實驗前需要先設定定時控制器外，在實驗過程中亦需要定時開啟針閥，令反洗出的懸浮溶液可從側邊出口排出。本實驗之定時控制器設定為：過濾 600s 後，再進行反洗 30s，重複循環操作，並且於反洗操作時開啟針閥，過濾進行時關閉針閥。

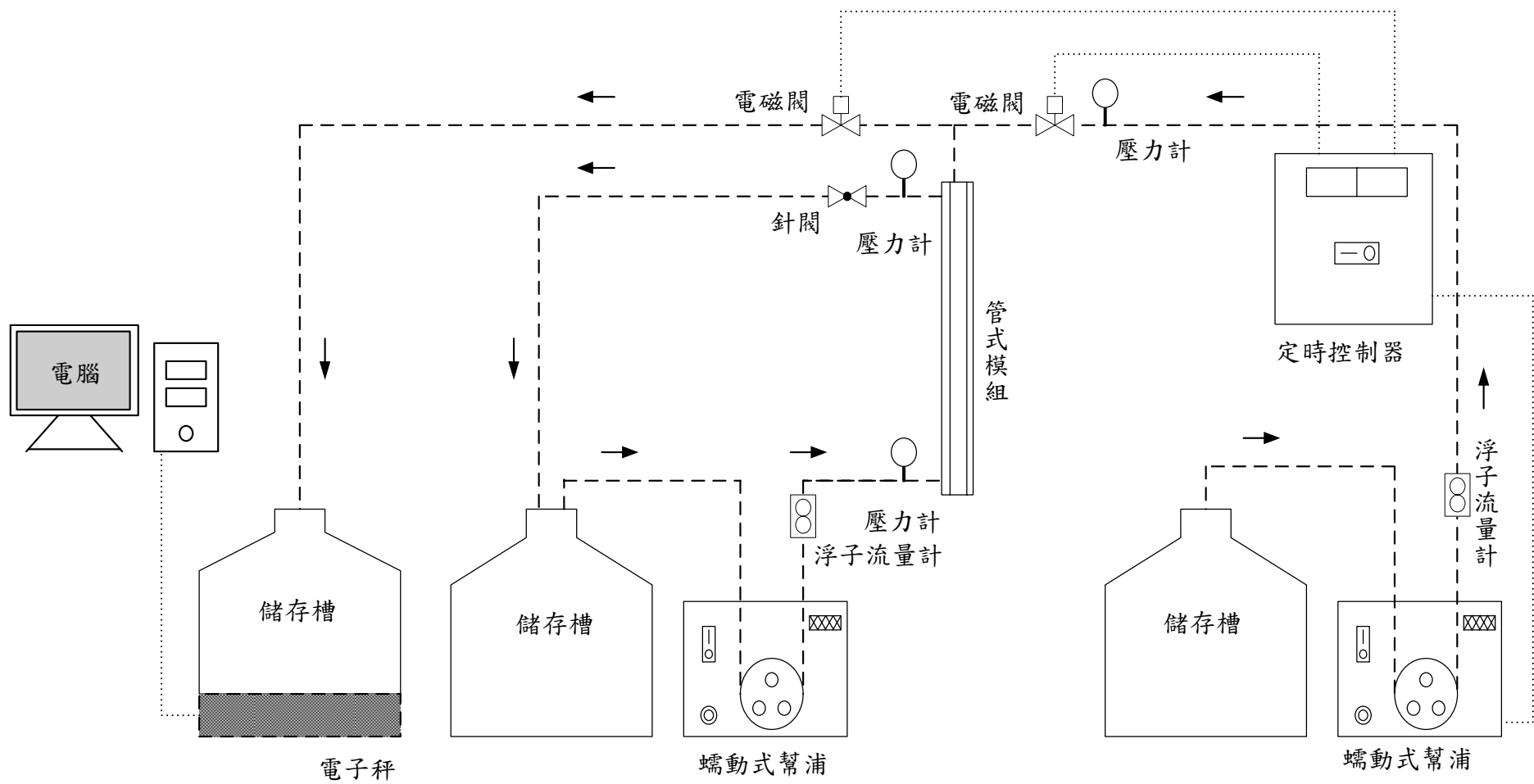


圖 3-16 間歇性反洗操作(Case-1)之管式膜過濾基本系統之示意圖

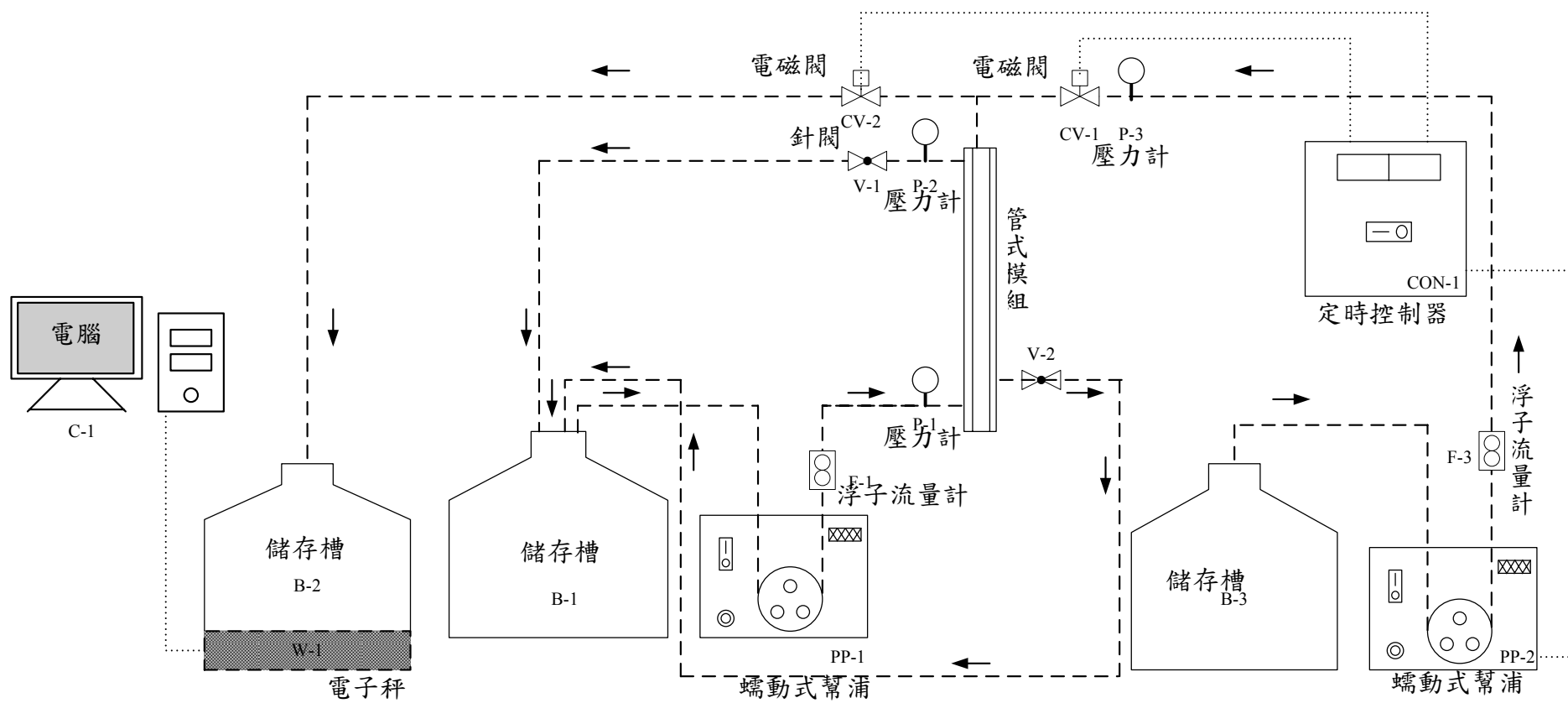


圖 3-17 間歇性反洗操作(Case-2)之管式膜過濾基本系統之示意圖

3-6 實驗分析儀器

1. 電子天平 Precisa XS225A，瑞士製造，淡江大學薄膜分離實驗室。精確讀數 ± 0.001 g，最大秤重量 225 g，用於秤取粉體。
2. 電子天平 Precisa BJ8100D，瑞士製造，淡江大學薄膜分離實驗室。精確讀數 ± 0.1 g，最大秤重量 8100 g，用於接收濾液與製備懸浮液。
3. 場放射槍掃描式電子顯微鏡（Field Emission Gun Scanning Electron Microscopy, FESEM）LEO-1530，德國製造，淡江大學金相實驗室。用以觀察粒子在薄膜表面上之堆積情形與在薄膜內部的阻塞狀況。

3-7 實驗步驟

1. 將預先浸泡的管式膜取出，以清水沖洗乾淨後置於殼管內，墊上矽膠墊片，並利用器具將模組裝設好，預防有滲漏的情形發生。
2. 再將預配製已知重量百分濃度的 PMMA 懸浮溶液置於儲槽中，利用攪拌器將懸浮液均勻攪拌，使 PMMA 粉體均勻的分散在儲槽中。
3. 實驗前先使用清水運作於過濾系統，一方面將系統中的空氣排出，另一方面將濾室內部清洗乾淨，避免實驗之誤差。
4. 為確保實驗之準確性，實驗前須先以測試清水濾速是否回復為依據，確定管式膜是否清洗乾淨。
5. 開始實驗。啟動 pump，將懸浮液輸送至過濾模組中，調整流量計與針閥

來控制掃流速度與過濾操作壓差。並將回流管拉至儲槽中以便回流。

6. 開啟電腦之天平接收軟體，開始進行實驗。觀察所接收的濾液重數據，然而，儲槽中會因過濾的濾液被收集，而造成槽中的懸浮液量減少，使濃度有所改變，因此，在過濾期間要隨時補充等量的蒸餾水，而維持原實驗濃度。
7. 觀察濾液值，等待濾液值在長時間下維持一定值，此時即可停止實驗。實驗結束後，進行管式膜清洗操作，開啟電磁閥，令清水濾液由濾液端進入進流端，沖刷掉累積在膜面中的粒體。待無粉體流出後，將模組拆卸，並且取出模組內之管式膜，將其置於浸泡液中。
8. 改變不同的操作條件，然後重複以上各步驟。

3-8 實驗操作條件

(1) PMMA 溶液管式膜微過濾實驗

進料濃度 (wt%)：0.1、0.3、0.5

進料端流速 (m/s)：0.1、0.2、0.4

操作壓力 (kPa)：25、50、75

進料溫度 (°C)：25

(2) PMMA 溶液外加側流之管式膜微過濾實驗：

進料濃度 (wt%) : 0.3

進料端與側流端質量流率比例 (g/s) : [8.5 : 8.5]、[17 : 8.5]、[17 : 17]
→ ([0.1 : 0.1]、[0.2 : 0.1]、[0.2 : 0.2]) (m/s)

操作壓力 (kPa) : 50

進料溫度 (°C) : 25

(3) PMMA 溶液間歇性反洗操作之管式膜微過濾實驗(Case-1)：

進料濃度 (wt%) : 0.3

進料端流速 (m/s) : 0.2

操作壓力 (kPa) : 50

進料溫度 (°C) : 25

反洗操作壓力 (kPa) : 100

(4) PMMA 溶液間歇性反洗操作之管式膜微過濾實驗(Case-2)：

進料濃度 (wt%) : 0.3

進料端流速 (m/s) : 0.2

操作壓力 (kPa) : 50

進料溫度 (°C) : 25

反洗操作壓力 (kPa) : 100

3-9 薄膜之清洗

薄膜清洗方面主要分為物理清洗與化學清洗。在物理清洗方面，於濾液端施加大於過濾時的操作壓力，令純水能夠滲透膜孔，將累積於薄膜上的粉體沖刷掉。不過，由實驗之經驗發現，單利用反洗方式清洗薄膜並無法有效的恢復原清水濾速，估計是因為原本大於膜孔徑的粉體在過濾之過程中，受到碰撞與壓迫的情況使其發生斷裂或者破碎，造成膜孔堵塞。因此，本實驗於反洗清洗後，再以硝酸溶液浸泡薄膜 24 小時，進行化學清洗。

3-10 注意事項

- (1) 實驗前必須先除去管路中所有的空氣。先以小流量流通所有的大小管，同時打開系統中的閥件，逐一趕掉管中之空氣。
- (2) 為了避免進料不均勻而導致實驗結果產生誤差，進料液於實驗前必須充分攪拌。
- (3) 實驗前務必以純水徹底洗淨殘留於管式膜上的浸泡液，以免影響進料溶液。

第四章 數值方法及模擬

本研究所使用的計算流體力學(Computational Fluid Dynamics, CFD)套裝軟體為 FLUENT 6.2，此軟體為由美國 FLUENT(Fluent, Inc . USA)公司所發展的計算流體力學分析軟體。此軟體主要可分為兩個部份，分為前處理之 GAMBIT 程式，用來繪製模型之空間構造、建立網格和設定所需要的邊界條件；而另一部份為後運算的 FLUENT 程式，此程式為運算的核心，包含了數值的分析運算，將運算出的結果以圖表方式輸出或是以數據方式呈現。因此以下為本研究模擬之介紹：

4-1 基本假設

本研究之系統為了簡化流場計算的複雜性，作了以下的假設：

- (1) 本系統為穩定狀態(steady state system)。
- (2) 流體為不可壓縮之牛頓流體(incompressible fluid)。
- (3) 流體具黏滯性(viscous fluid)。
- (4) 流場的重力加速度為 9.8 m/sec^2 。
- (5) 系統為恆溫狀態(isothermal system)。
- (6) 流體在固體邊界的相對速度為零，為無滑動條件(non-slip condition)。

4-2 裝置中流場空間之模擬

4-2-1 模型之空間建構

在使用流體力學計算軟體前，首先要將欲模擬的流場構造先繪製出來，在此是使用 FLUENT 軟體中所附的前處理程式 GAMBIT，主要是輔助 FLUENT 所需要之流場的空間建構。其實際裝置中的流場大小尺寸，如圖 4-1 及圖 4-2 所示，圖 4-1 為掃流過濾裝置中流場空間的比例圖，在圖中間薄層為多孔性薄膜；圖 4-2 為有側流之掃流過濾裝置中流場空間的比例圖，其中與圖 4-1 之差異為在側面多了一進口面。因此，則可以依據比例圖，使用前處理程式 GAMBIT 繪製出掃流過濾裝置中流場空間的構造。

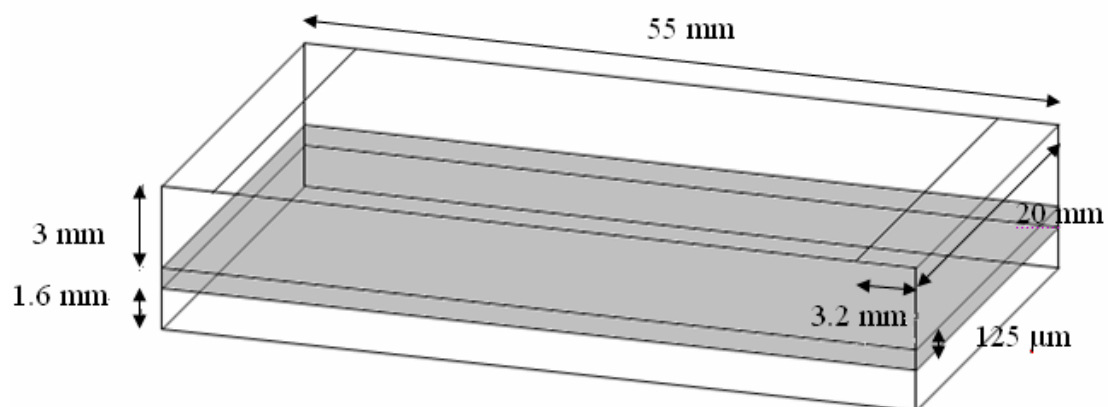


圖 4-1 掃流過濾裝置中流場空間的比例圖

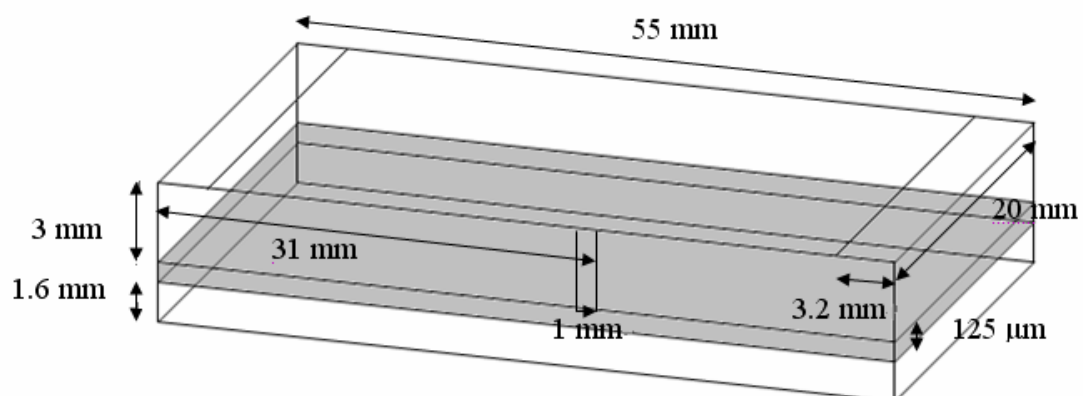


圖 4-2 有側流之掃流過濾裝置中流場空間的比例圖

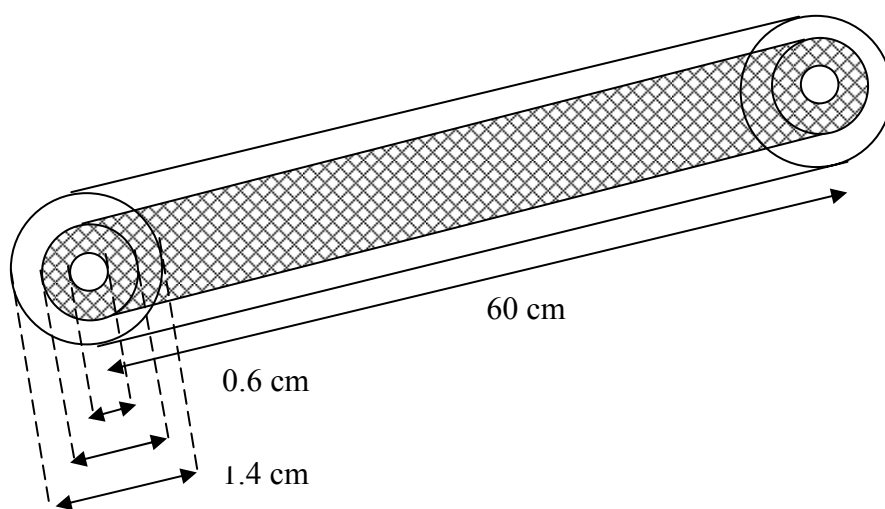


圖4-3 管式膜過濾裝置中流場空間的比例圖

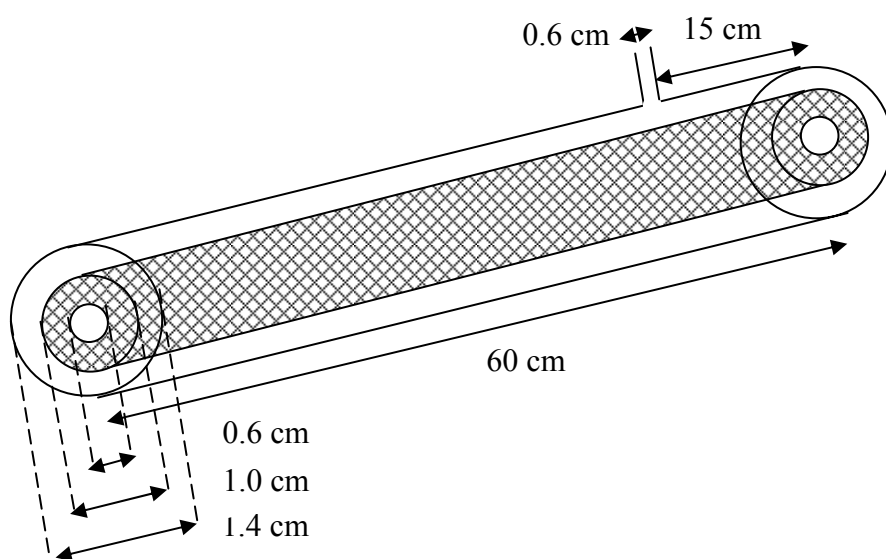


圖4-4 外加側流之管式膜過濾裝置中流場空間的比例圖

4-2-2 網格之建立

在依實際構造建構流場的空間之後，接下來為空間網格之建立，建立網格的用途主要是後續 FLUENT 計算所需，然而，由於網格數目的多寡，會影響到數值計算的準確性及運算時間，細緻的結構密度分佈，會使數值模擬更為準確，相反的收斂速度會相對增加。為了選取最佳的網格數目，先後建立幾組不同疏密程度的網格來進行模擬計算，討論及分析結果後，選擇最佳的網格數目來進行模擬計算(在此所使用的網格類型為 Tetrahedron Grid, TGRID)。圖 4-3 為掃流過濾裝置中流場空間的網格圖，其中，中間層的網格乃是多孔性薄膜所建構成的；圖 4-4 為有側流之掃流過濾裝置中流場空間的網格圖，相同的，在此網格圖中與圖 4-3 的差異性，為在側邊多了一個進口的網格面。此構造流體端與多孔薄膜的體積網格數分別大約為 250000 與 50000。在管式膜方面其總網格數約 500,000，套管中最內層濾室、中間層薄膜、最外層流場的網格數分別為 26,000、127,000、127,000。此外，網格的類型採用 Hex/Cooper，其主要是由四面體網格構成，可均勻的分布於模型中。圖 4-7 為本研究模擬管式膜過濾所使用之網格圖。

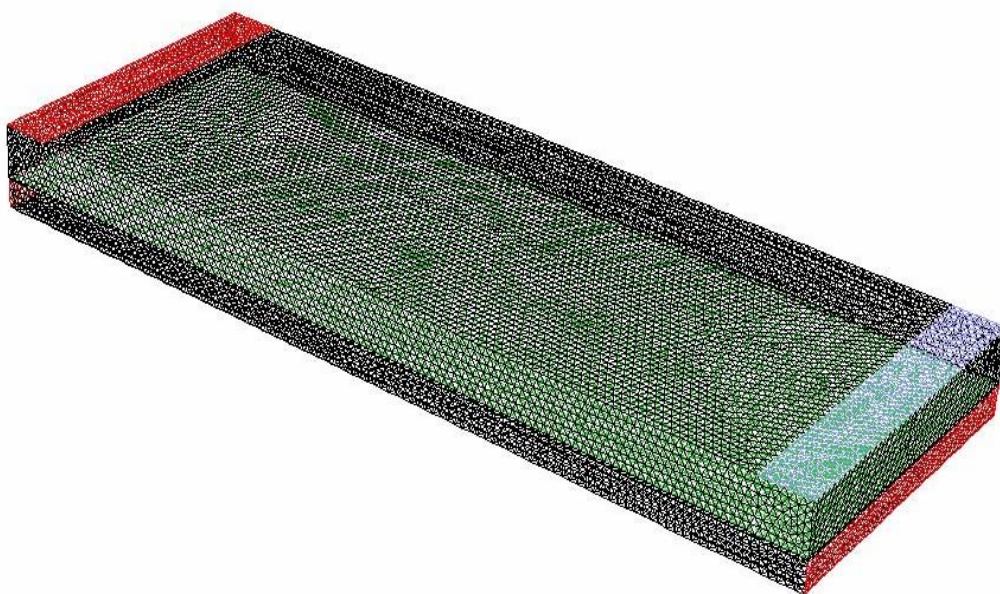


圖 4-5 掃流過濾裝置中流場空間的網格圖

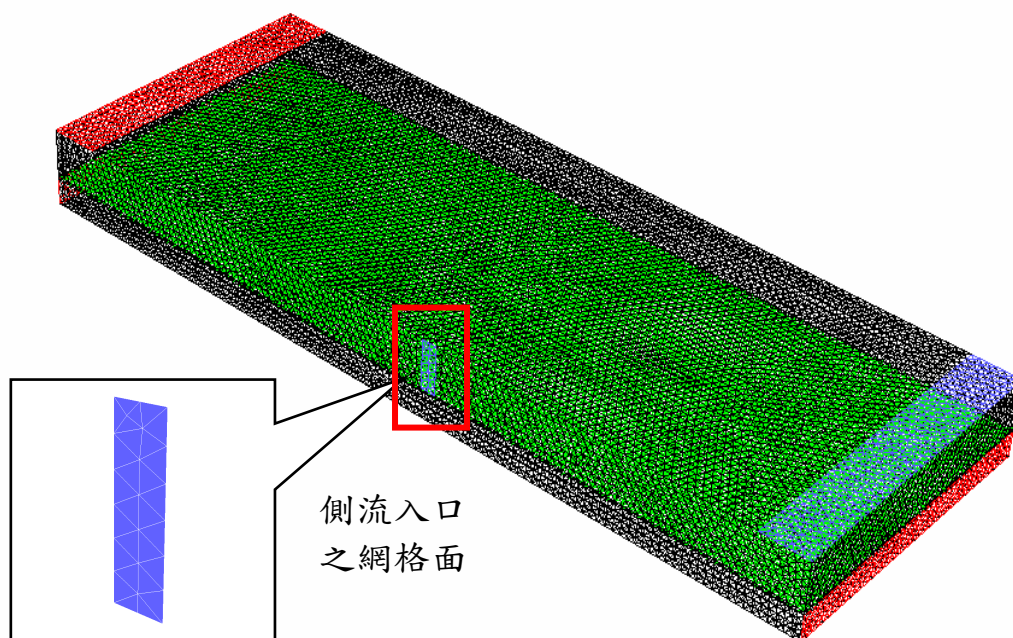


圖 4-6 有側流之掃流過濾裝置中流場空間的網格圖

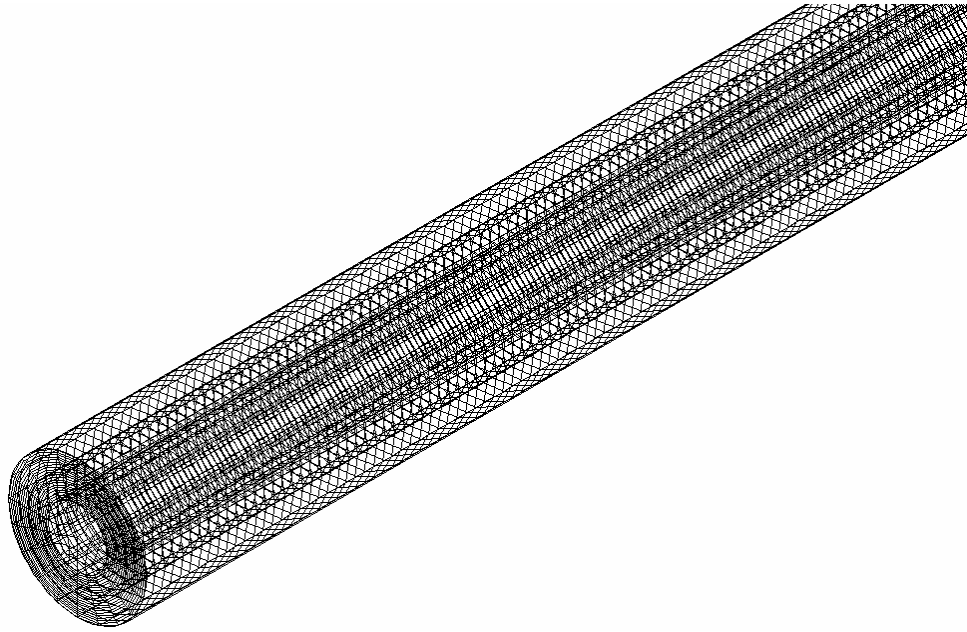


圖 4-7 管式膜過濾裝置中流場空間之網格圖

4-3 統御方程式與邊界條件

經過 GAMBIT 程式一連串之前處理步驟，接下來由此 CFD 的運算核心 FLUENT 程式做模擬運算，在本研究中之 FLUENT 程式乃依據以下方程式，以及邊界條件來運算處理：

4-3-1 連續方程式

濾室中流動之流體，依據質量守恆定律，其連續方程式可表示為：

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (4.1)$$

上式為質量守恆方程式， ρ 代表溶液密度， \vec{v} 代表速度向量。

4-3-2 穩態的Navier-Stokes方程式

在濾室中為牛頓流體之流動，其統御方程式為穩態的 Navier-Stokes 方程式，表示如下：

$$\left(\vec{u}_f^* \bullet \nabla \right) \vec{u}_f^* + Eu \nabla P^* = \frac{1}{Re} \nabla^2 \vec{u}_f^* \quad (4.2)$$

\vec{u}_f (m/sec) 為流體流速。式(4.2)中左邊兩項分別為慣性及壓力效應，而右邊則為黏滯效應。由於考慮慣性效應使得式(4.2)成為非線性偏微分方程式，因此需要數值求解。

4-3-3 多孔性薄膜內部的統御方程式

通過一多孔性薄膜內部之流體的流速為 \vec{u}_p ，其解釋黏度效應之統御方程式，表示如下：

$$Re \vec{u}_p^2 = -\beta^2 \vec{u}_p^* - Eu Re \nabla P^* \quad (4.3)$$

其中 Eu 為尤拉數 ($Eu = P_o / \rho V^2$)， Re 為雷諾數 ($Re = D_e \rho V / \mu$)， β 為無因次透過率 ($\beta = D_e / k^{0.5}$)， P^* 為無因次壓力 ($P^* = P / P_o$)， \vec{u}_p^* 為無因次速度 ($\vec{u}_p^* = \vec{u}_p / V$)。在方程式(4.3)中流體的黏度假設跟環境的黏度相同，則右邊項為Darcy定律，左邊是Darcy定律修正項。

其模擬與上述方程式的邊界條件如下：

$$\vec{u}_f = v \quad @ \text{進口} \quad (4.4a)$$

$$\vec{u}_f = v_{recycle} \quad @ \text{回流} \quad (4.4b)$$

$$P = 0 \quad @ \text{ 出口 1 與出口 2} \quad (4.4c)$$

$$\vec{u}_p = \vec{u}_f \quad @ \text{ 薄膜表面} \quad (4.4d)$$

$$\nabla \vec{u}_p = \nabla \vec{u}_f \quad @ \text{ 薄膜表面} \quad (4.4e)$$

然而，圖 4-8 所表示的是在系統中，各部份在計算上所適用的統御方程式與邊界條件。其中 \vec{u}_f 為在流道中的流體流速、 \vec{u}_p 為在多孔性薄膜內部的流體流速，方程式(4.4a)表示掃流速度維持一定值，方程式(4.4b)表示回流速度為 $v_{recycle}$ ，以上均依據實驗來決定。方程式(4.4c)表示出口壓力為大氣壓力。方程式(4.4d)與(4.4e)分別表示連續的流體速度狀態與經過膜表面的剪應力。

本研究乃利用計算流體力學程式 FLUENT 與體積的交錯網格，配合邊界條件(4.4a)~(4.4e)，求解統御方程式(4.2)及(4.3)，而得到所要的結果。

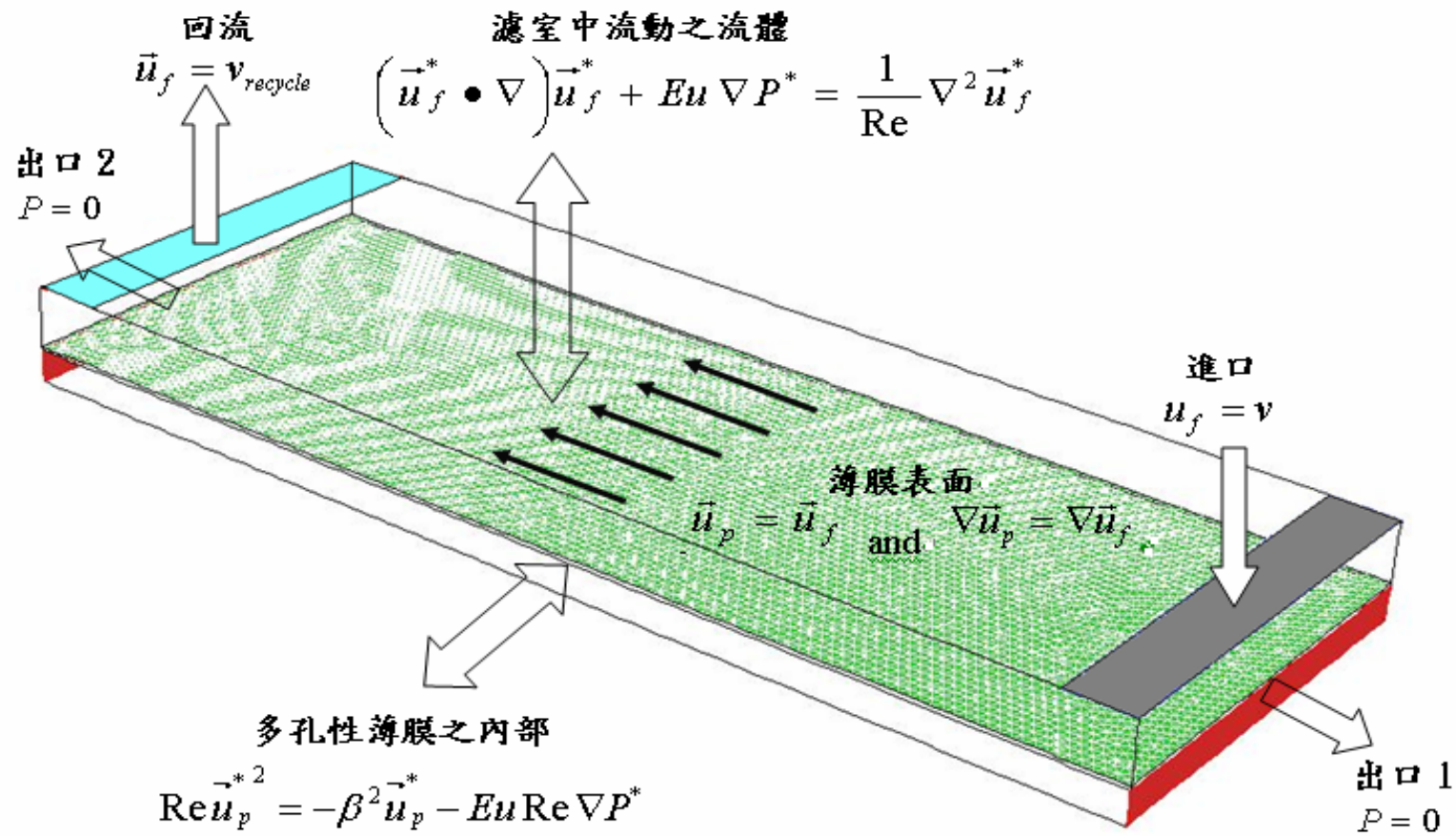


圖 4-8 系統中各部份在計算上的統御方程式與邊界條件示意圖

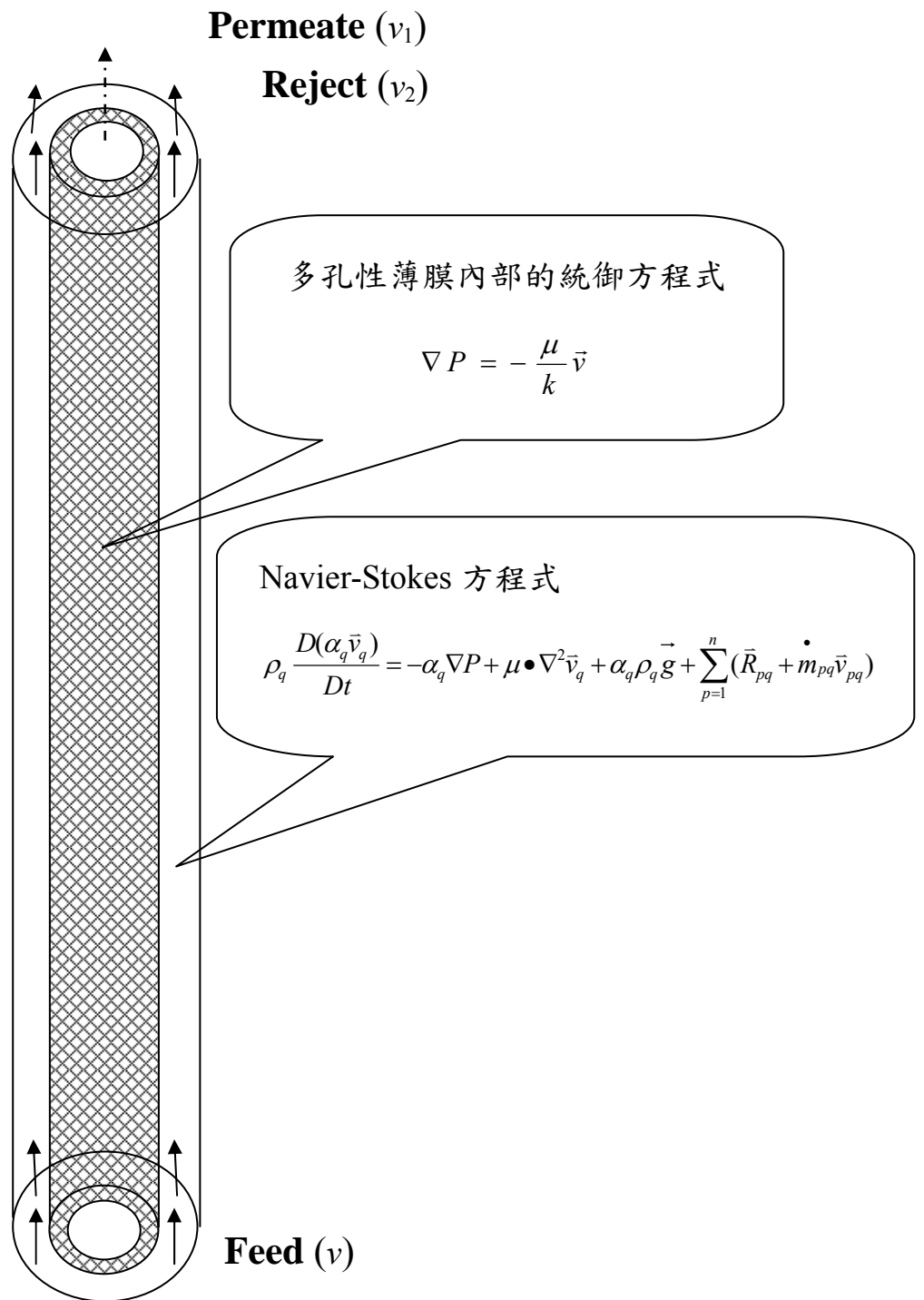


圖 4-9 系統中在計算上的統御方程式與邊界條件示意圖

4-4 數值方法

在數值模擬計算中，FLUENT 乃利用控制體積法(control-volume-based)的特性來求解流場問題，將各個統御方程式離散成代數方程式，並選擇分離求解法(segregated solution method)，來進行疊代模擬。在分離求解法中，非線性的統御方程式一律要轉換成線性化，以形成微小體積中獨立變數的方程式系統，而在每一個微小控制體積中，所使用的有限體積法是利用守恆原理的觀念，將統御方程式化簡成通式，其中的物理量將伴隨著不同係數而使方程式所對應的兩邊達平衡。

在本研究中，預設流體最大的相對速度誤差在 10^{-4} ，則收斂值即有相當的準確性。其運算速度上會因不同的設定值而有所差異，隨後等待數值收斂，再針對所讀出的數據資料加以分析討論。另外，數值疊代的步驟，可由圖 4-10 得知。



圖 4-10 數值模擬之疊代計算流程圖

第五章 結果與討論

在平板研究中，主要針對膜面上的阻力以及受力變化情形加以分析研究，依據構造和所探討之內容不同，可分為以下各部份：1.掃流過濾實驗數據分析；2.掃流過濾阻力模擬之分析；3.掃流過濾膜面之受力分析；4.有側流之掃流過濾膜面受力分析；5.有側流之掃流過濾實驗數據分析；6.有側流之掃流過濾阻力模擬分析；7.濾餅形成之動態分析。

5-1 掃流過濾實驗數據分析

在掃流過濾實驗中，為了探討操作條件對過濾效果之影響，因此，在本研究上乃針對不同的掃流速度、過濾壓差、以及懸浮液濃度來進行掃流過濾實驗，以得到在不同操作條件下的濾速衰減情形與阻力之變化。在濾速衰減之變化方面，其操作參數包括了不同的掃流速度(0.1、0.2 及 0.3 m/sec)；不同的過濾壓差(25、50 及 75 kPa)；和不同的懸浮液濃度(0.1、0.2 及 0.3 wt%)。

在固定懸浮液濃度及固定過濾壓力下，不同的掃流速度與濾速之間的關係，由圖 5-1 所示。由圖中可以看到在各條件下，不同的掃流速度其濾速衰減的變化情形，而觀察出當操作在較高掃流速度下時，可得到較高濾速之結果。操作在較高掃流速度下，之所以可得到較高濾速值，乃因

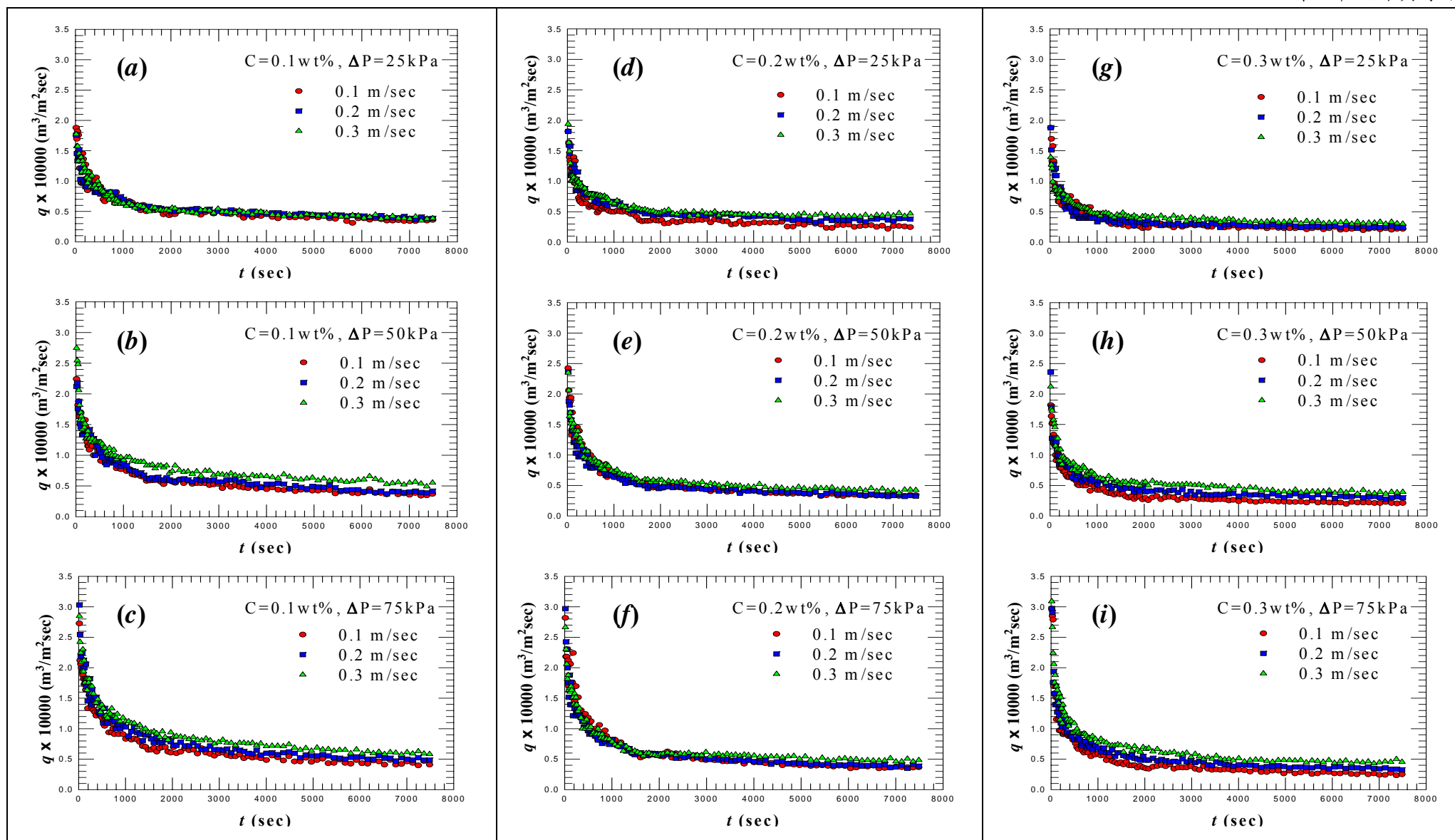


圖 5-1 定懸浮液濃度與定過濾壓差下不同的掃流速度與濾速之間的關係

為高掃流速度提供了較高的水力剪應力，進而延緩膜面上的阻塞速率，因此可從圖中看到當操作在高掃流速度下時，濾速衰減程度較緩慢；相反的，在低掃流速度下，濾速衰減就相當的快速，尤其是在高懸浮液濃度下更是明顯。值得一提的是，圖 5-1(a) 為操作在懸浮液濃度為 0.1 wt%、過濾壓差為 25 kPa、以及不同掃流速度下的濾速衰減圖，由圖中可以看出當掃流速度改變時，其濾速受影響的程度較小，乃由於操作在低濃度、低過濾壓差下，膜面上所沈積的粒子數量並不多，因此濾餅層的厚度較薄，所以操作在低掃流速度下與高掃流速度下的濾餅層厚度差異不大，進而濾速衰退的情形也相當雷同。

在掃流過濾的濾速衰減過程中，過濾初期由於膜面上的濾餅還未完整的形成，因此可得到較高的濾速，但隨時間的增加而濾餅漸漸的形成，並且濾餅的結構變得較為緻密，因此濾速會逐漸的衰退，最後濾速會趨於穩定，則稱此時的濾速值為穩定濾速。圖 5-2(a)、5-2(b) 為操作在不同條件下穩定濾速與掃流速度之比較，由圖中可得知，穩定濾速隨著掃流速度增加而增加，這是因為增加掃流速度時，在膜面上以及濾餅層上的剪應力也相對增加，進而抑止濾餅的成長，達到提升濾速的效果。因此濾餅量也隨著掃流速度的增加而相對的減少，其操作在各條件下濾餅量與掃流速度之比較，由圖 5-2(c)~5-2(d) 所示，由圖中可以看到，膜面上的濾餅重隨著掃流速度的增加而逐漸減少，其減少的程度以高懸浮液濃

度狀態下較為明顯，主要的原因是操作在高懸浮液濃度時，膜面上所累積的粒子量較多，所以掃流速度之提升對累積在膜面上的粒子影響較大，相對的濾餅重的變化也較明顯。隨著濾餅量的減少，濾餅所造成的阻力也相對的降低，因此使用過濾的理論公式，式(2.21)，來得到過濾總阻力值之大小，經整理由圖 5-2(e)~5-2(f) 所示，由圖中可看出過濾總阻力隨著掃流速度增加而減少。另外，從圖 5-2(f) 中觀察出，在高懸浮液濃度以及高過濾壓差下時，掃流速度的改變對過濾總阻力的影響較大，這是因為當懸浮液控制在高濃度下時，由於濃度較高再加上高過濾壓差，所以膜面上累積的濾餅量較多，因此提高掃流速度對濾餅量的影響較為顯著，掃流速度越高則濾餅量越少，則過濾總阻力也越小。

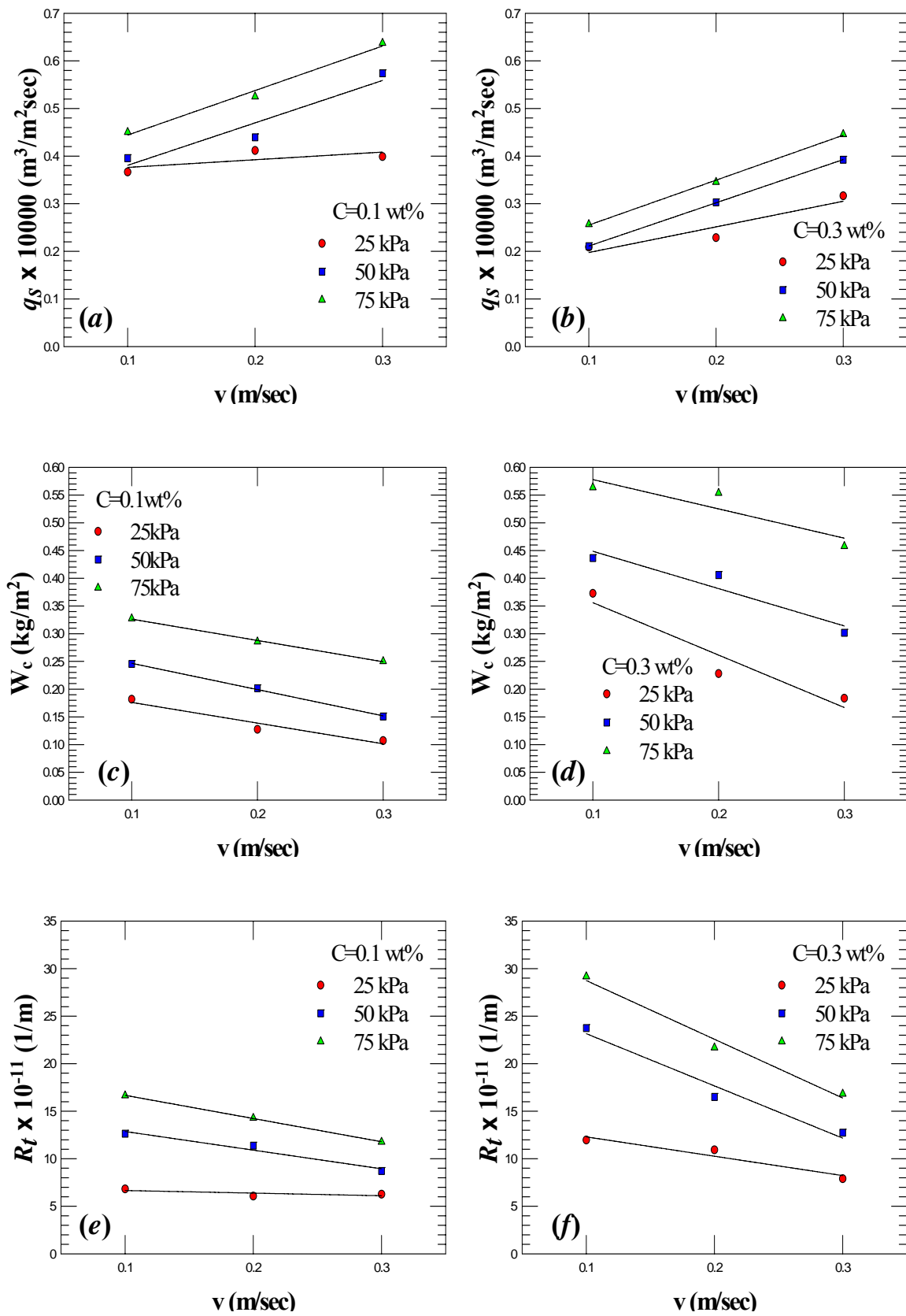


圖 5-2 不同操作條件下穩定濾速、濾餅重及過濾總阻力對掃流速度作圖

接著，針對在固定掃流速度及固定懸浮液濃度下，不同的過濾壓差與濾速之間的關係加以探討，如圖 5-3 所示，由圖中可以看到在各條件下，不同的過濾壓差其濾速衰減的變化情形，而觀察出當操作在高過濾壓差下時，可得到較高濾速值。操作在較高過濾壓差下，之所以能得到較高濾速值，主要因為提高過濾壓差能增加垂直膜面的驅動力，進而促進懸浮液通過濾面而增加濾速值。

由不同操作條件下濾速衰減的情形來看，在過濾初期，操作在不同過濾壓差其濾速仍有所差別，但隨著時間增長，到過濾末期時，由於濾餅層已經形成，當增加過濾壓差會將濾餅層擠壓的更緻密，因此，濾速並不會隨著過濾壓差的增加而持續的增加下去，所以當操作在高壓下時，穩定濾速的增加量較少，因而造成各過濾壓差下的濾速值差異並不多。唯有圖 5-3(g) 其穩定濾速有較明顯的區別，主要是因為操作在高掃流速下(0.3 m/sec)以及低懸浮液濃度下(0.1 wt%)，粒子不易堆積在膜面上，因此增加過濾壓差對濾餅結構的影響不大，所以增加過濾壓差對穩定濾速之提昇有較明顯的變化。

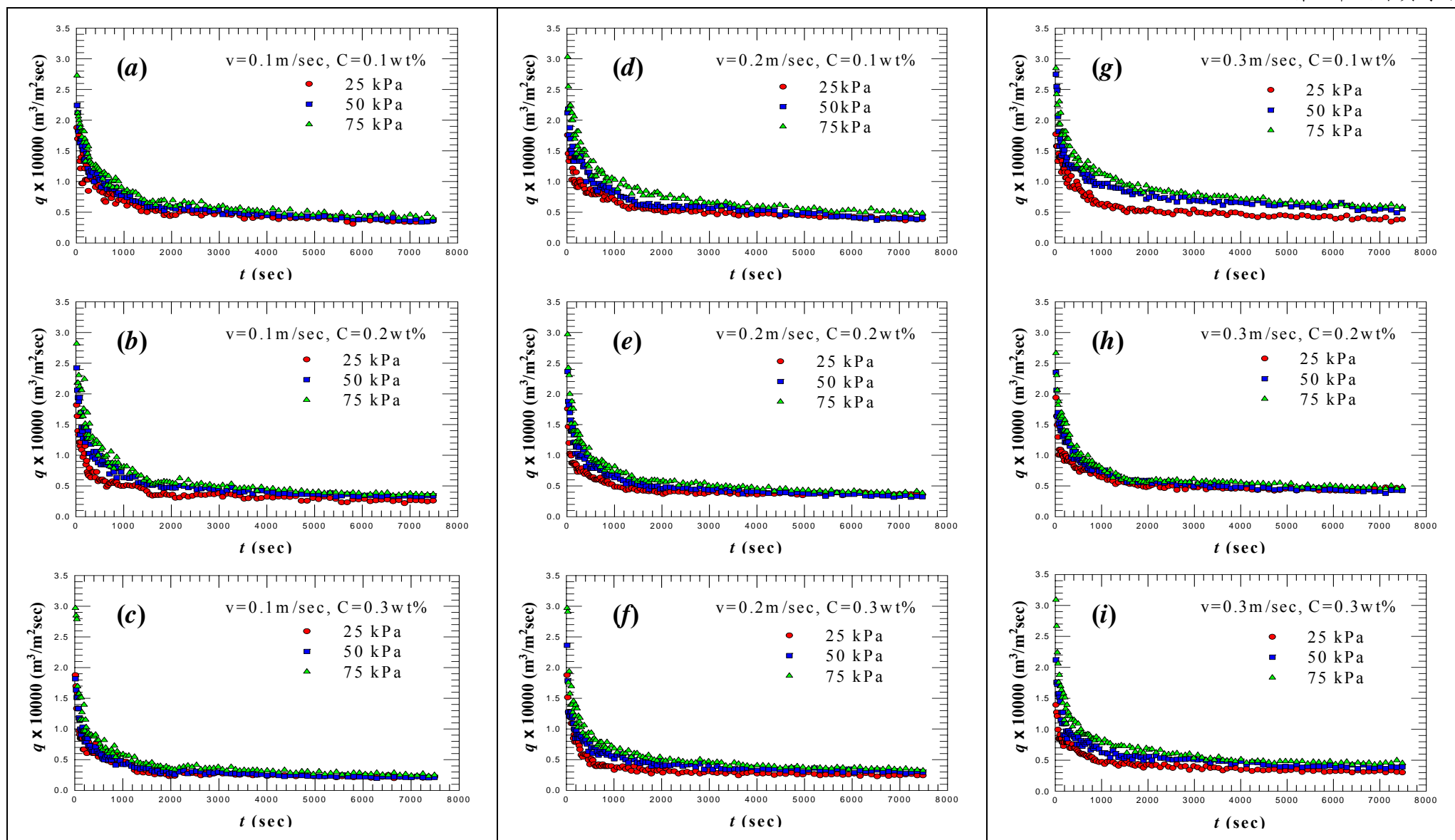


圖 5-3 定掃流速度與定懸浮液濃度下不同的過濾壓差與濾速之間的關係

在各條件下之過濾壓差對穩定濾速的比較，如圖 5-4(a)~5-4(b) 所示，由圖中得知，操作在高過濾壓差下，可得到較高的穩定濾速值，另外，由圖上很明顯的表示出，當操作在高掃流速度下(0.3 m/sec)及低懸浮液濃度下(0.1 wt%)時，穩定濾速隨過濾壓差之改變的幅度較大。

雖然提高過濾壓差能增加垂直膜面的驅動力，但是增加垂直膜面的驅動力相對的會提升粒子堆積在膜面上的機會，而造成濾餅量的增加，如圖 5-4(c)~5-4(d) 所示，由圖中可看出，濾餅量隨著過濾壓差的增加而增加。當濾餅量增加時則過濾阻力相對的也會有所增加，相同的，使用過濾理論公式將過濾總阻力求出，經整理後如圖 5-4(e)~5-4(f) 所示，由圖中觀察出當過濾壓差提升時，過濾總阻力也隨著增加。

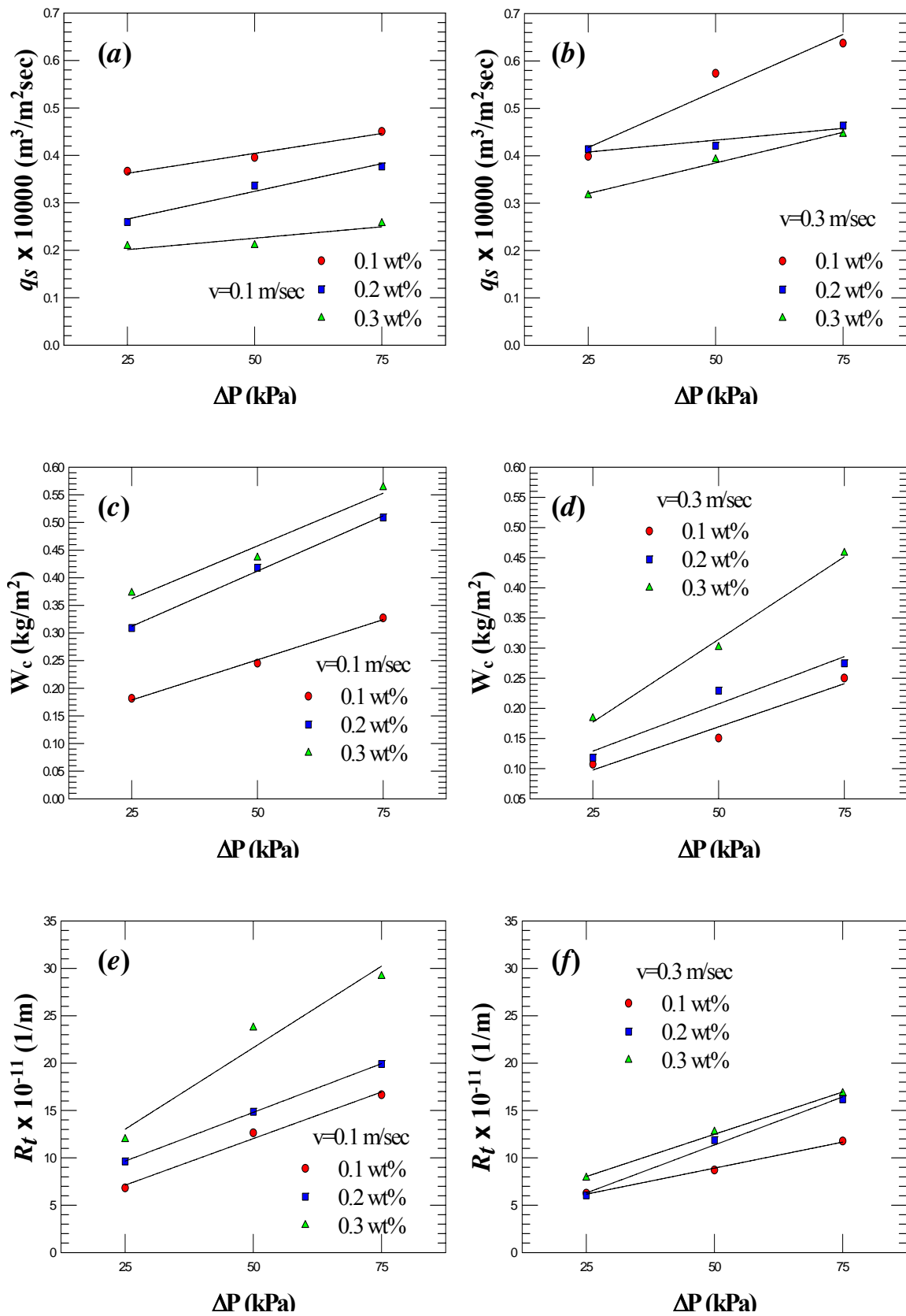


圖 5-4 不同操作條件下穩定濾速、濾餅重及過濾總阻力對過濾壓差作圖

最後，針對在固定掃流速度及固定過濾壓差下，不同的懸浮液濃度與濾速之間的關係加以探討，如圖 5-5 所示，由圖中可以看到在各條件下，不同的懸浮液濃度其濾速衰減的變化情形，而觀察出當操作在低懸浮液濃度下時，可得到較高濾速值。操作在低懸浮液濃度下，之所以能得到較高濾速值，主要因為低懸浮液濃度中的懸浮粒子較少，因此會在膜面上堆積的粒子較少，使得過濾的阻力較小進而提升了濾速值。

在不同操作條件下之濾速衰減情形中，在過濾初期時，濾速迅速的衰減，尤其是操作在高懸浮液濃度下時最為明顯。主要因為操作在高懸浮液濃度下時懸浮粒子數量較多，與膜面接觸的機率較大，因此，粒子較容易堆積在膜面上，使得粒子堆積在膜面的量較多，濾餅層形成較快速，濾液要通過濾餅層較為不易。在各種操作條件下之懸浮液濃度與穩定濾速的關係，由圖 5-6(a)、5-6(b) 所示，由圖中可看出，穩定濾速隨懸浮液濃度增加而逐漸遞減。當懸浮液濃度提高時，表示膜面上附著的粒子數量增加，其濾餅量與懸浮液濃度之間的關係，由圖 5-6(c)~5-6(d) 所示，由圖中觀察得到，濾餅量隨懸浮液濃度之增加而增加。濾餅量的增加也表示出過濾總阻力也相對的提高，同樣的，使用過濾理論公式求出過濾總阻力大小，如圖 5-6(e)~5-6(f) 所示，從圖中得到，當懸浮液濃度增加時，過濾總阻力會隨之增大。

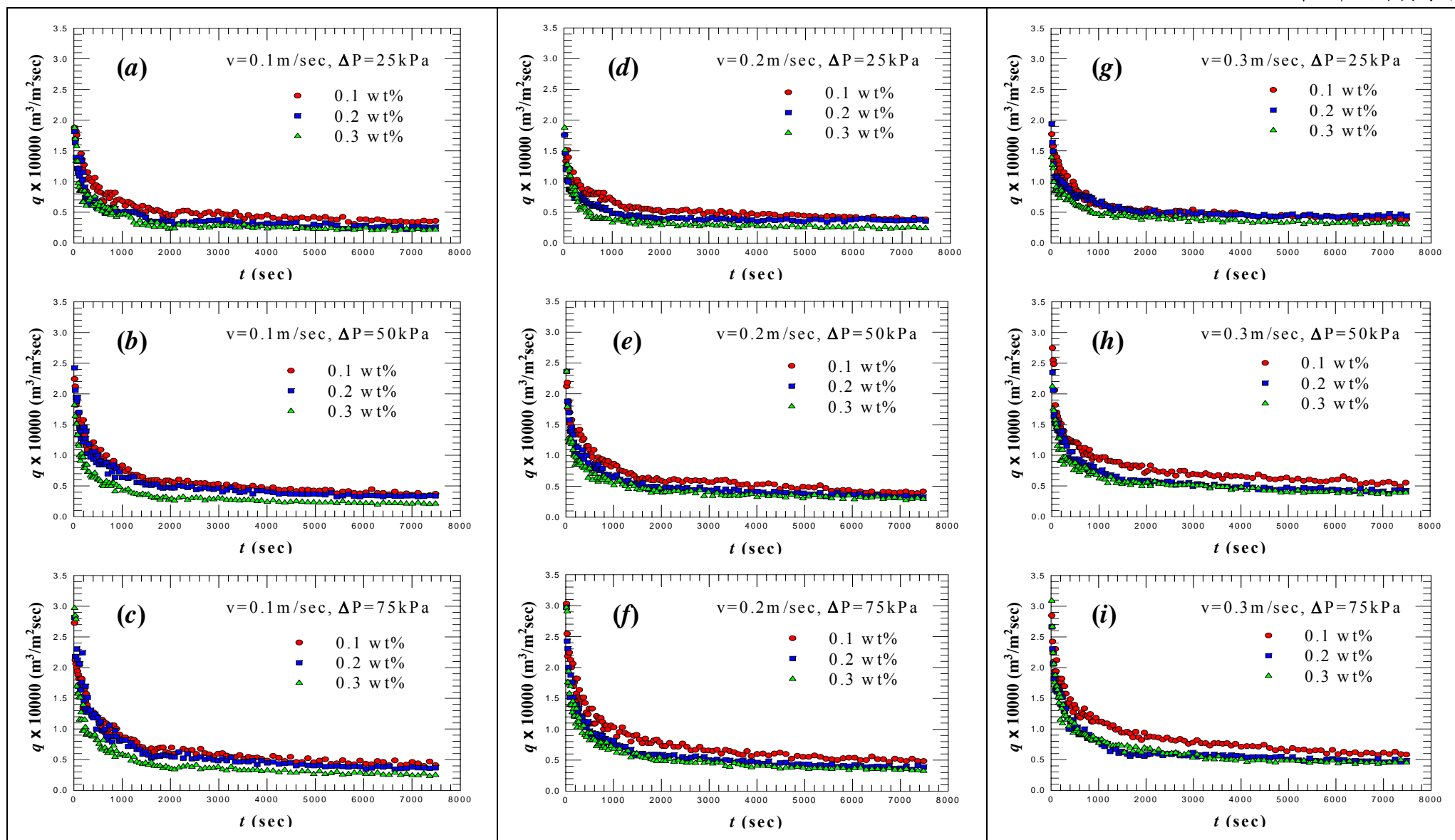


圖 5-5 定掃流速度與定過濾壓差下不同的懸浮液濃度與濾速之間的關係

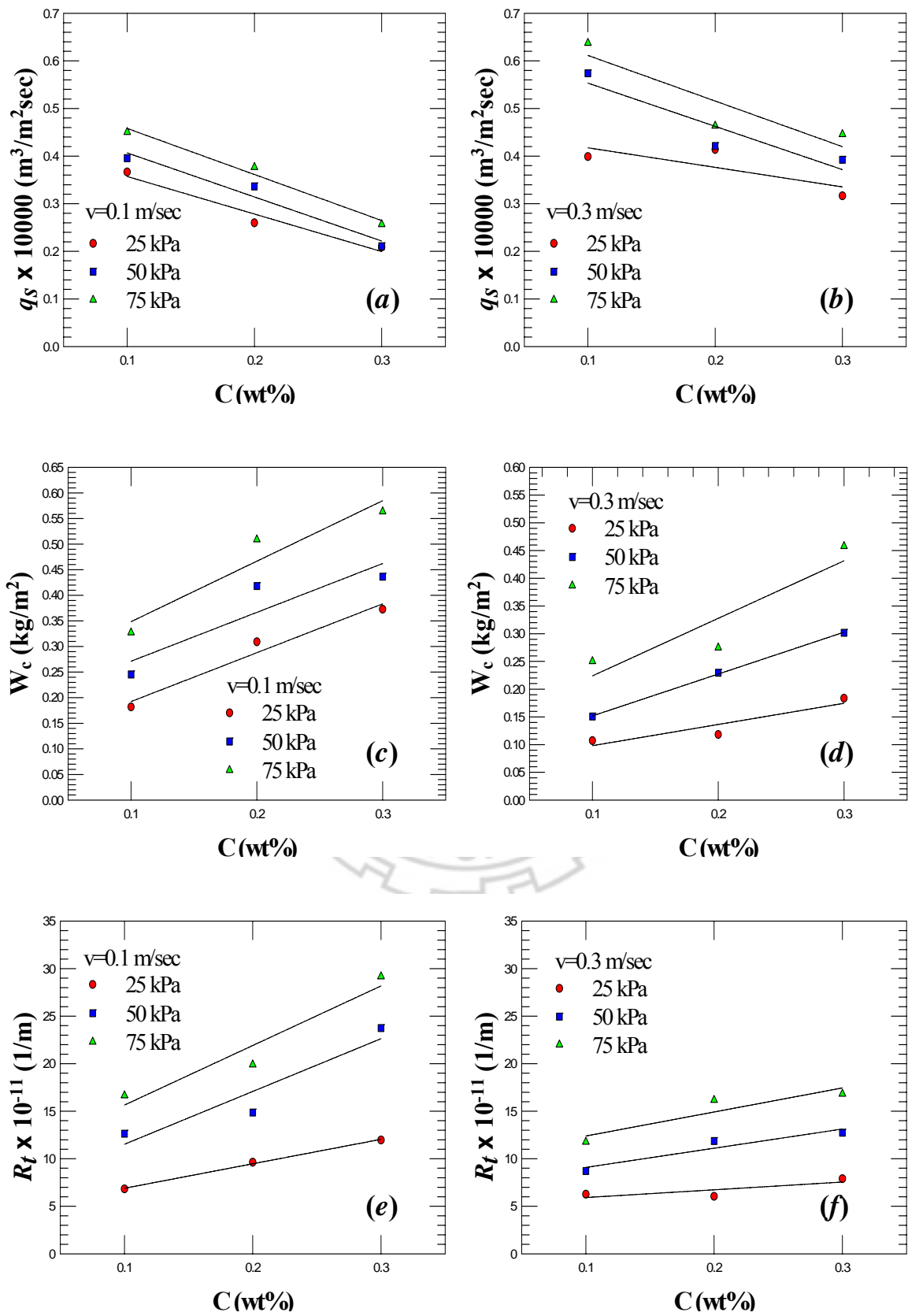


圖 5-6 不同操作條件下穩定濾速、濾餅重及過濾總阻力對懸浮液濃度作圖

5-2 掃流過濾阻力模擬之分析

觀察掃流過濾實驗結束後的膜面濾餅分佈之情形，發現膜面上濾餅並非均勻分佈，因此針對此現象，將膜面上之流體流動情形進行模擬，希望藉由模擬得到整體過濾阻力之變化，以及膜面上的受力分佈情形。為了要更詳細的闡述在掃流膜過濾實驗中，操作參數與整體過濾阻力之間的關係，乃使用 FLUENT 作掃流過濾之模擬。在本研究之計算方式上，主要是依據實驗所得到之數據而加以分析模擬，針對在各種操作條件下的濾速衰減變化作擬穩態之模擬，進而得到濾速與過濾總阻力之關係。

對過濾總阻力之模擬方法，由以下加以介紹說明，首先，將各操作條件下要分析的濾速衰減圖，做趨勢線的回歸運算，所以濾速衰減圖經回歸處理，可以得到由濾速對時間作圖之回歸曲線，如圖 5-7 所示，由圖中可看到在各種操作條件下的實驗數據圖與對應的回歸曲線，其中，圖 5-7(a)為在操作條件(濃度 0.2 wt%、過濾壓差 25 kPa、掃流速度 0.1~0.3 m/sec)下的濾速對時間比較圖，與其相對應的回歸曲線圖是圖 5-7(b)，同理，圖 5-7(c)~圖 5-7(f) 各別相互對應。

當各操作條件下的回歸曲線繪製完成後，在本研究中乃針對濾速隨時間衰減之變化作擬穩態模擬，因此在濾速衰退的回歸曲線上，取出不同時間點所對應之濾速值(q_t)，作為擬穩態模擬之分析點，如圖 5-7(b)、圖 5-7(d)、圖 5-7(f) 所示。接下來，將各操作條件下的回歸曲線各別作分析，

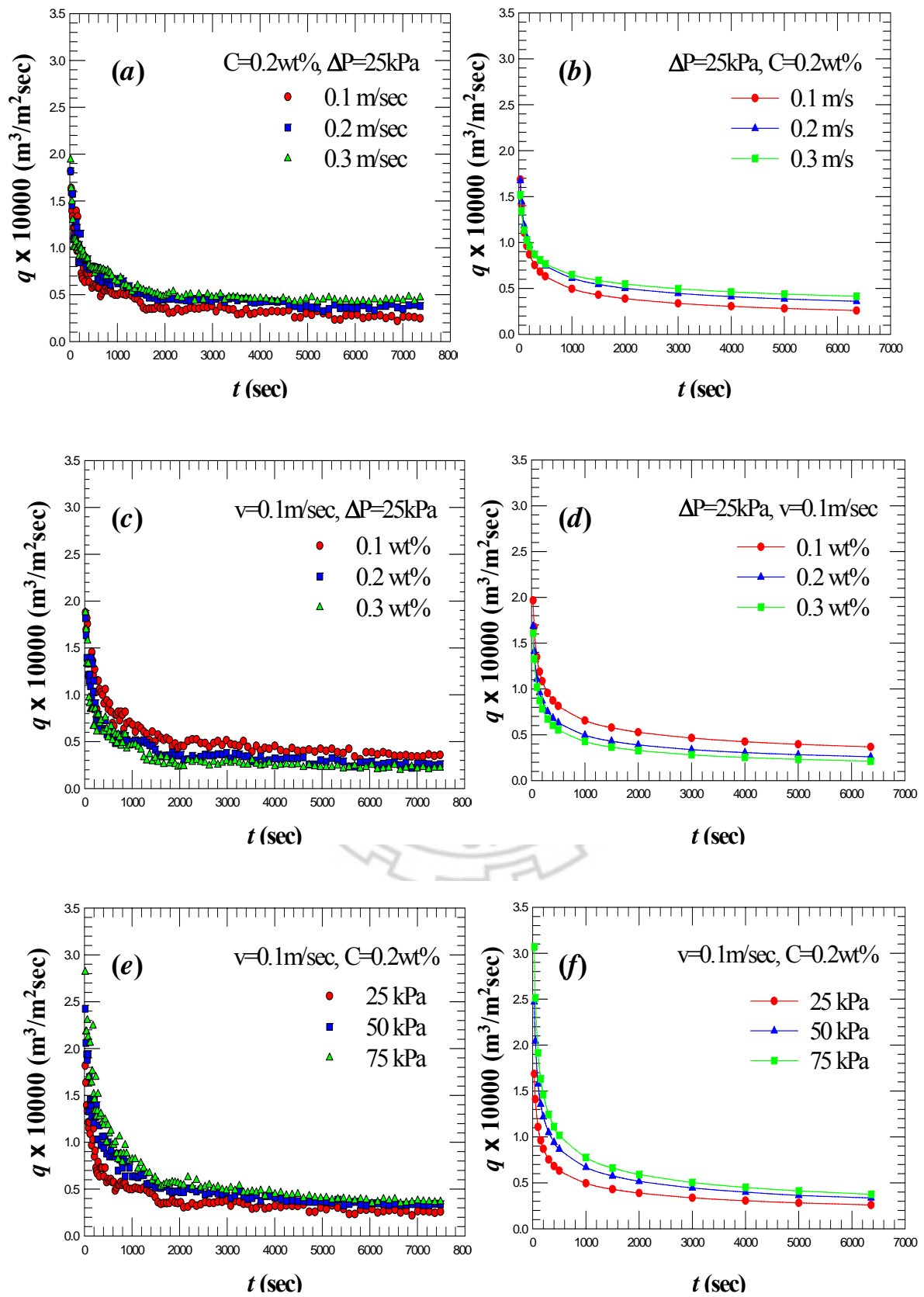


圖 5-7 不同操作條件下的實驗數據與回歸曲線之呈現

在各曲線中的 q_t 值經換算後，可以得到回流端 $v_{recycle}$ 之速度值，即式(4.4b)，接著在 FLUENT 程式中設定回流端 $v_{recycle}$ 之速度值以及 β 值，其運算的方式為將 $v_{recycle}$ 之速度值以及 β 值代入式(4.3)當中，然後求解式(4.2)~(4.4)，等待數值運算收斂後，針對多孔性介質之薄膜的上下層作過濾壓差之計算。利用 try-and-error 的方式改變不同 β 值，直到計算出多孔性薄膜上下層的壓差為設定值，則當 β 值確定後，將 β 值換算成整體總阻力 R_t [即，式(2.21)所稱 $R_t = R_c + R_{cp} + R_{if} + R_m$ ，其中， R_c 為濾餅阻力、 R_{cp} 為濃度極化層所造成之阻力、 R_{if} 為薄膜內部阻塞所造成之阻力以及 R_m 為乾淨薄膜之阻力。另外，當時間 $t = 0$ 時(即過濾之初始點)，由於過濾剛開始則 R_c 、 R_{cp} 及 R_{if} 三項阻力還未形成，所以此時之 $R_t = R_m$ 。]，此時在擬穩態模擬過程中之一時間點的模擬已完成。在不同時間上濾速及過濾總阻力的模擬方式如同上述之步驟，因此，經由此方式我們可以得到濾速與過濾總阻力隨時間之變化，如圖 5-8 所示，圖 5-8 為定過濾壓差(25 kPa)與定掃流速度(0.1 m/sec)下，不同懸浮液濃度之濾速與過濾總阻力的模擬比較，從圖中可以看到，在濾速衰減之回歸曲線上，各點 q_t 值會相對應出 R_t 值， R_t 值會隨濾速衰減而逐漸增大，另外，由圖 5-8(a)~5-8(c) 也可以觀察出當懸浮液濃度增加時，擬穩態中的過濾總阻力各點也會隨之增加。接下來，圖 5-9 也是利用前面所敘述之方式，將不同操作條件下之擬穩態過濾總阻力模擬出，同樣的， R_t 值也會隨濾速衰減而逐漸增大

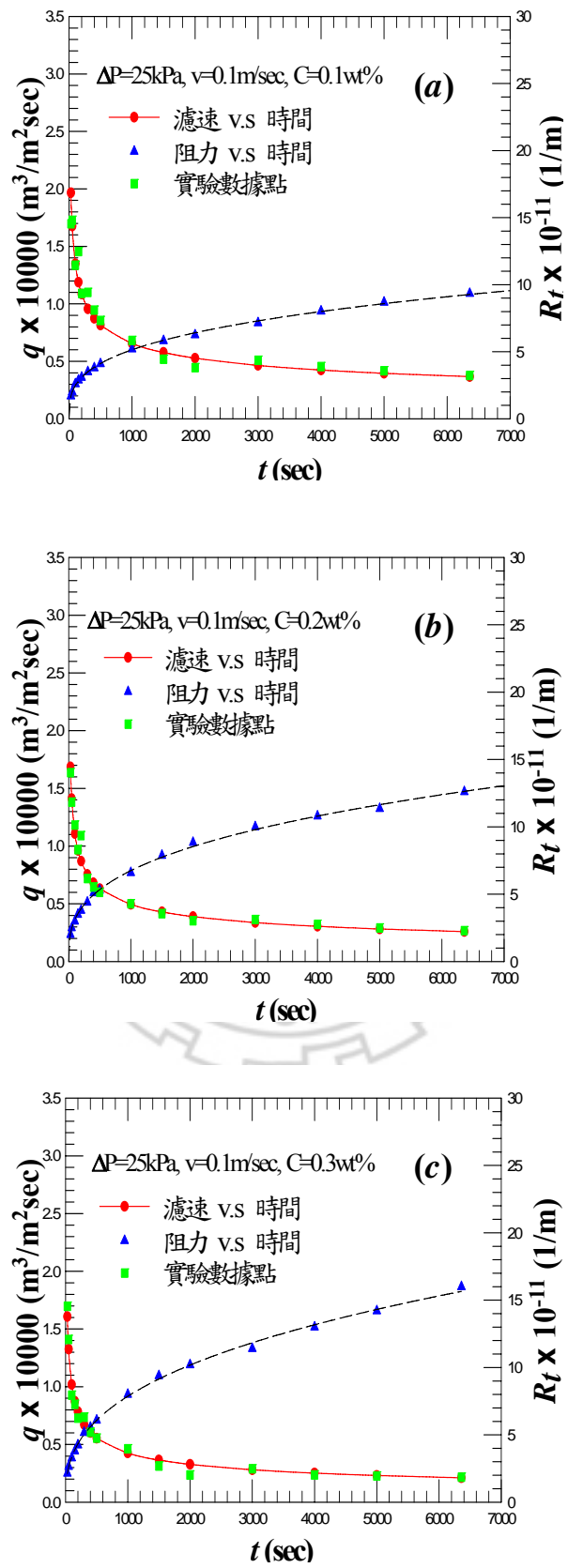


圖 5-8 不同懸浮液濃度下濾速與過濾總阻力隨時間變化之模擬

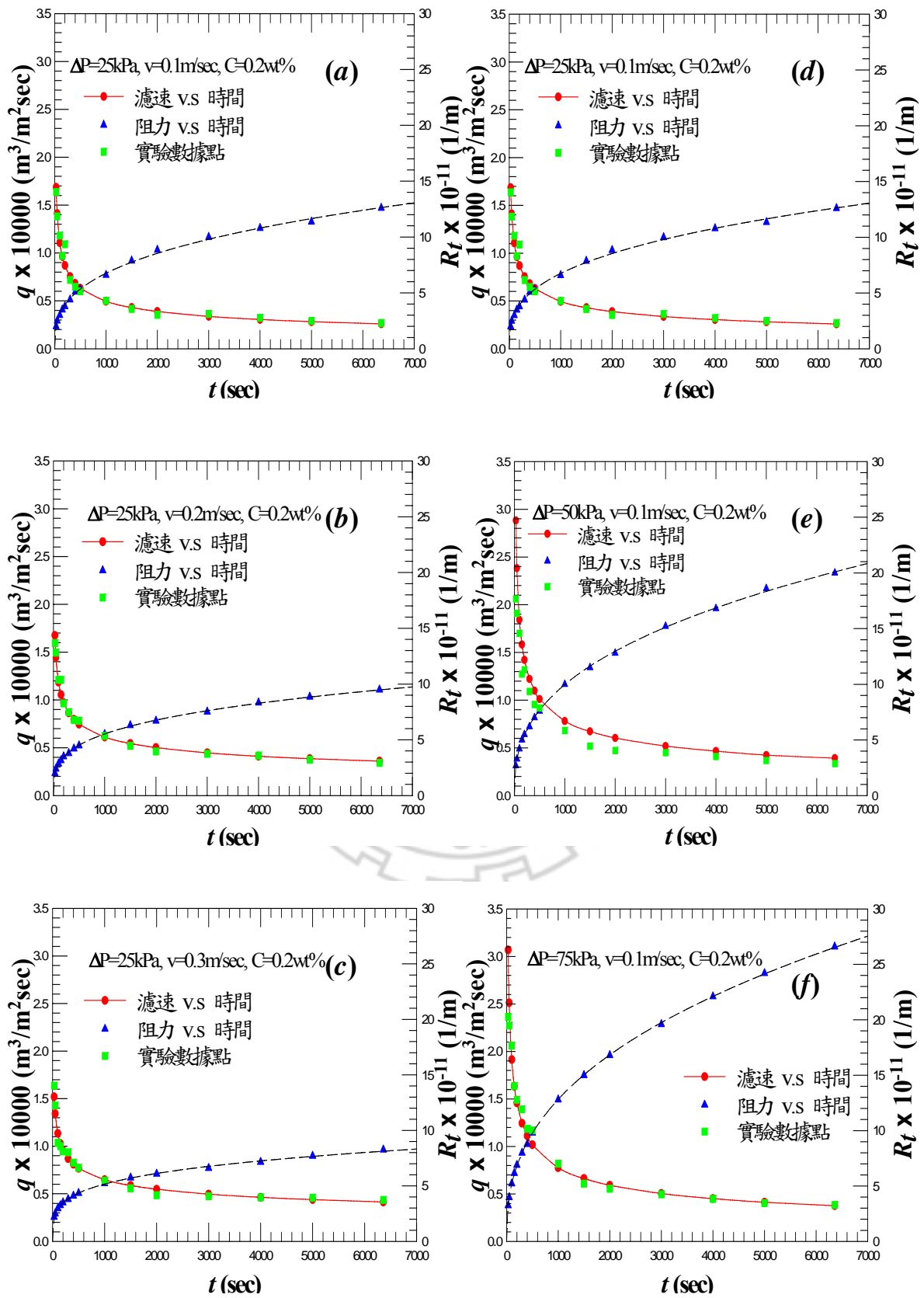


圖 5-9 不同掃流速度及過濾壓差下濾速與過濾總阻力隨時間變化之模擬

，其中，圖 5-9(a)~5-9(c) 為定過濾壓差(25 kPa)與定懸浮液濃度(0.2 wt%)下，不同掃流速度之濾速與過濾總阻力的模擬比較，由圖中可以得到當掃流速度增加時，擬穩態中的過濾總阻力各點會隨之減小；另一部份，圖 5-9(d)~5-9(f) 為定掃流速度(0.1 m/sec)與定懸浮液濃度(0.2 wt%)下，不同過濾壓差之濾速與過濾總阻力的模擬比較，由圖中可以得到當過濾壓差增加時，擬穩態中的過濾總阻力各點會隨之增加。

當在各種操作條件下的濾速衰減變化已模擬完成，並得到濾速與過濾總阻力之關係後，接下來，將各操作條件下過濾總阻力隨時間變化之關係加以比較說明，圖 5-10 為在不同操作條件下過濾總阻力隨時間變化之模擬比較(在此 R_t 所代表之意義為 $R_t = R_c + R_{cp} + R_{if} + R_m$ ，其各別之定義如同前面所敘。)。由圖 5-10(a) 可以看到，當定過濾壓差(25 kPa)、定懸浮液濃度(0.2 wt%)下，掃流速度增加其擬穩態中的過濾總阻力各點會隨之減少；由圖 5-10(b) 觀察出，當定過濾壓差(25 kPa)、定掃流速度(0.1 m/sec)下，懸浮液濃度增加其擬穩態中的過濾總阻力各點會隨之增加；由圖 5-10(c) 得到，當定掃流速度(0.1 m/sec)、定懸浮液濃度(0.2 wt%)下，過濾壓差增加其擬穩態中的過濾總阻力各點會隨之增加。由圖 5-10(a)~5-10(c) 之間比較得到，改變過濾壓差的大小對過濾總阻力之影響，較其他兩者為大。

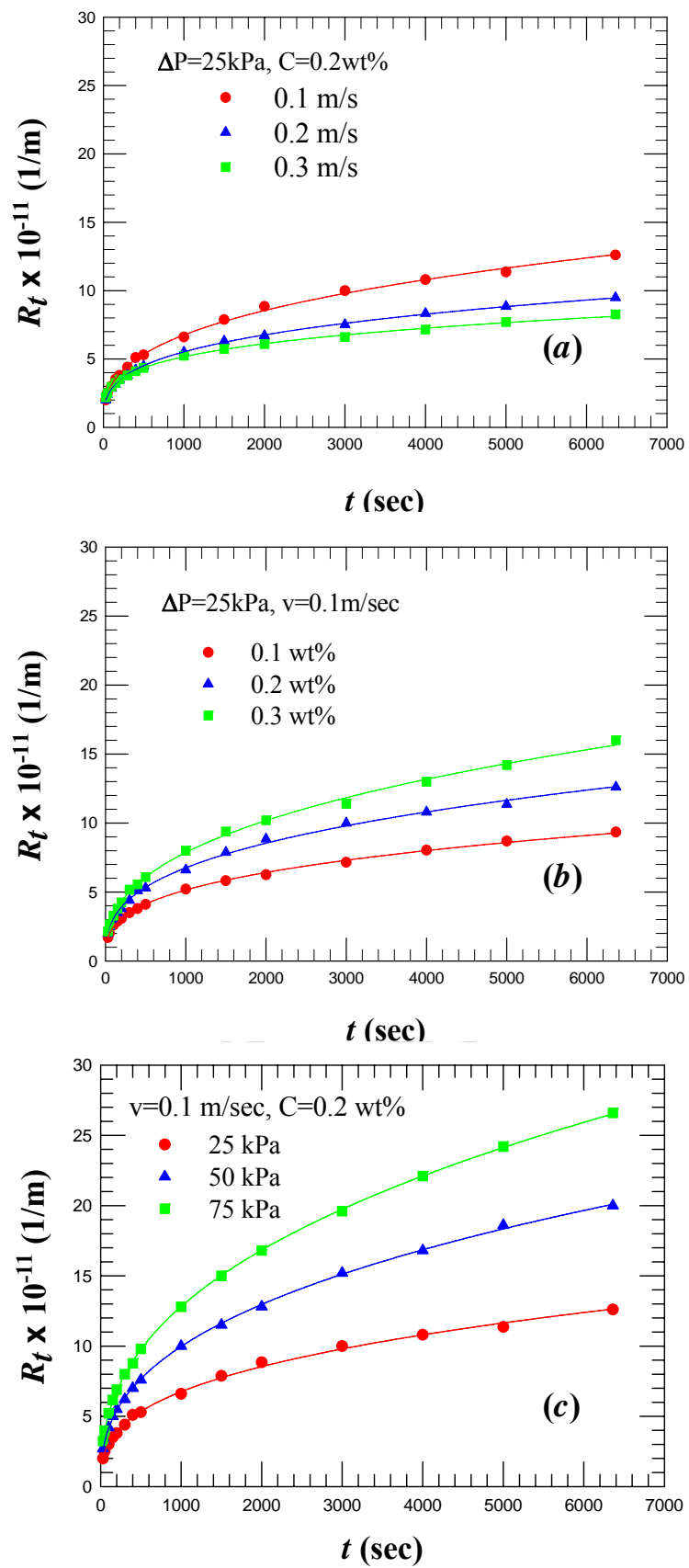


圖 5-10 不同操作條件下過濾總阻力隨時間變化之模擬比較

5-3 掃流過濾膜面之受力分析

在掃流膜過濾程序中，膜面上之剪應力大小對濾速之影響甚鉅，而剪應力的大小由膜面上之掃流速度而定，因此，在本研究乃針對掃流過濾系統中，濾室內部之流態加以模擬，進而分析膜面上之受力分佈情形。雖然本研究乃使用單一相(水相)作流態模擬分析，但可由圖 5-11 以及圖 5-12 明顯的看到，速度隨移動距離之增加而遞減，說明了粒子可能會累積在低流速之區域。在圖 5-11 當中($v = 0.1 \text{ m/sec}$, $\Delta P = 25 \text{ kPa}$)，圖 5-11(a) 為膜面上速度向量圖，由圖中可以看到，膜面上流體流動的方向為向左流動，其速度向量隨移動的距離增加而逐漸變小，接下來，圖 5-11(b)、圖 5-11(c)、圖 5-11(d) 分別為距膜面 0.5 mm 的速度分佈圖、膜面上的速度分佈圖以及膜內部的速度分佈圖。由以上圖中可以看到距膜面較遠的速度值會較大，隨著越接近膜面其速度會逐漸減少，最後在膜內部中心的速度則接近於零。另外，在圖 5-12 當中($v = 0.3 \text{ m/sec}$, $\Delta P = 25 \text{ kPa}$)，相同的，圖 5-12(a) 為膜面上速度向量圖，流動方向也是向左流動，由圖中也可觀察出，其速度向量隨移動的距離增加而逐漸變小，而圖 5-12(b)、圖 5-12(c)、圖 5-12(d) 也分別為距膜面 0.5 mm 的速度分佈圖、膜面上的速度分佈圖以及膜內部的速度分佈圖，由以上圖中，依然可以看出速度會隨著接近膜面而逐漸減少。在此需注意的是，由於圖 5-11 以及圖 5-12 所呈現的速度分佈範圍有所不同，因此座標軸的速度上限也有所差異。

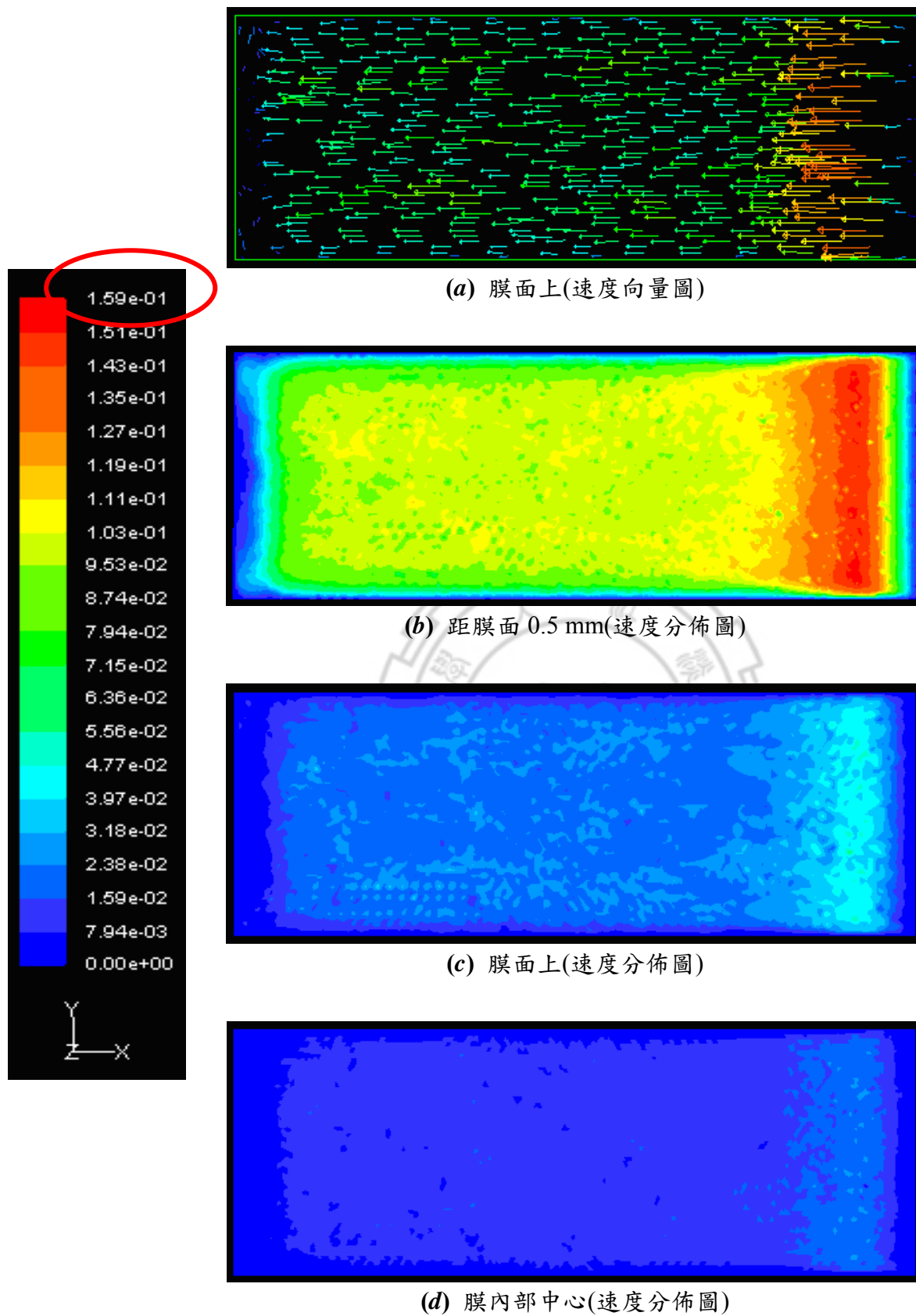


圖 5-11 濾室內不同高度的速度分佈圖($v = 0.1 \text{ m/sec}$, $\Delta P = 25 \text{ kPa}$)

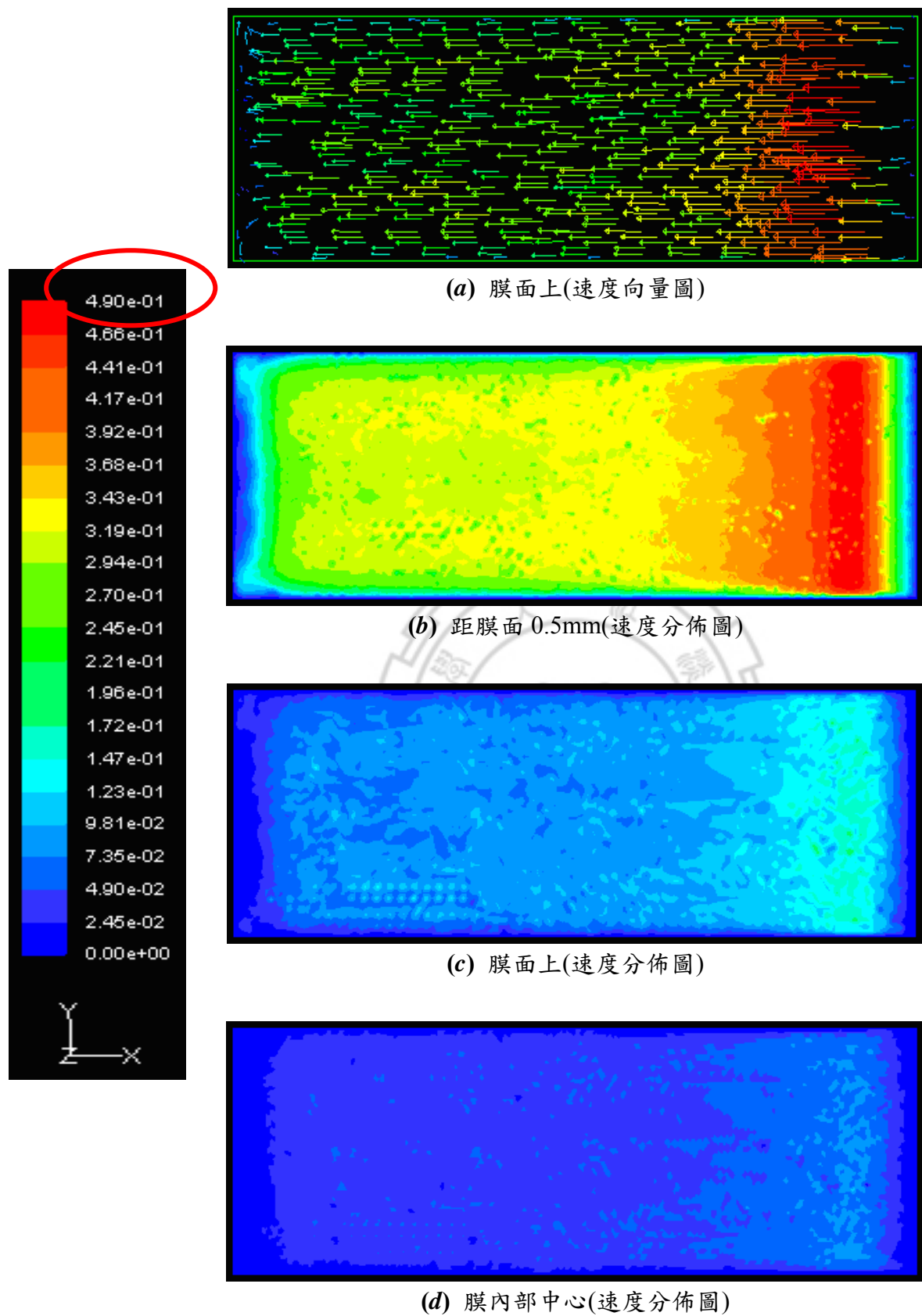


圖 5-12 濾室內不同高度的速度分佈圖($v = 0.3 \text{ m/sec}$, $\Delta P = 25 \text{ kPa}$)

在濾室內流態變化情形探討結束後，接下來，針對膜面上的受力分佈加以分析，圖 5-13 為不同操作條件下膜面剪應力值之比較。流體流經膜面的全長為 5.5 cm，由於進口端效應以及出口端效應的影響，因此在 0.825 cm 之前以及 4.675 cm 之後的區域其數據值不予採用，由圖中可以看到，膜面上的剪應力大小會隨著掃流距離而逐漸減小。當操作在低流速下時(0.1 m/sec)，剪應力隨著流動方向幾乎維持一定值。當速度操作在 0.2 m/sec 時，剪應力之衰退量約為三分之一，由 0.00015 N(0.825 cm)減少至 0.0001 N(1.925 cm)，粒子可能會累積在流動方向的中間區域上。當速度操作在 0.3 m/sec 時，各點剪應力的值幾乎都大於 0.2 m/sec 下之值(當 $v = 0.3$ m/sec，在 4.125 cm 位置時，其受力值為 0.00015 N，然而，當 $v = 0.2$ m/sec，在 0.825 cm 位置時，其受力值只有 0.000149 N)。由此得知，較高的掃流速度可形成較大的剪應力，因此只有少數的粒子可能會沈積在膜面上。

已藉由模擬計算出膜面上的受力分佈情形，並且比較出在不同掃流速度下彼此之差異，於是吾人將實驗結束後之濾餅分佈情形加以拍攝，與計算出之受力變化相互對應，如圖 5-14 所示，其中，圖 5-14(a) 為掃流速度 0.1 m/sec 之膜面濾餅分佈情形，隨著速度逐漸增加而分佈情形之變化如圖 5-14(b)、圖 5-14(c) 所示，由以上圖中可以觀察到，在高掃流速度(0.3 m/sec)下，膜面上濾餅生成的量較少並且較為稀疏；而低掃流速度

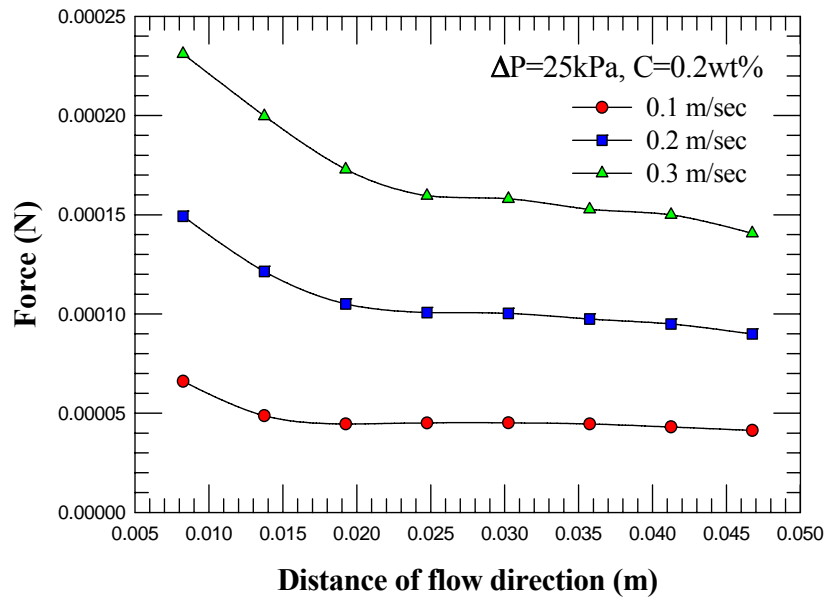


圖 5-13 不同操作條件下膜面剪應力值之比較



(a) $\Delta P=25\text{ kPa}$, $C=0.2\text{ wt}\%$, $v=0.1\text{ m/sec}$



(b) $\Delta P=25\text{ kPa}$, $C=0.2\text{ wt}\%$, $v=0.2\text{ m/sec}$



(c) $\Delta P=25\text{ kPa}$, $C=0.2\text{ wt}\%$, $v=0.3\text{ m/sec}$

圖 5-14 不同操作條件下膜面濾餅分佈之比較

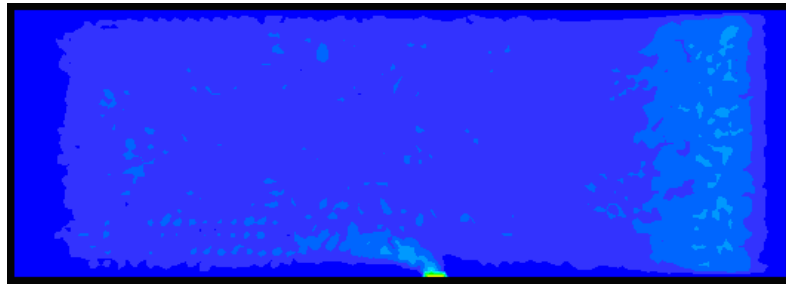
(0.1 m/sec)下，膜面上濾餅生成的量相對較多。由膜面上濾餅分佈之情形看來，其粒子較容易累積在流動方向的中間區域上，此現象與計算膜面上之剪應力分佈的結果相符，尤其在高掃流速度(0.3 m/sec)下此現象最為明顯。由以上結果驗證了膜面上施予高剪應力確實能抑止濾餅的生成，並且其結果與模擬分析相當一致。

5-4 有側流之掃流過濾膜面受力分析

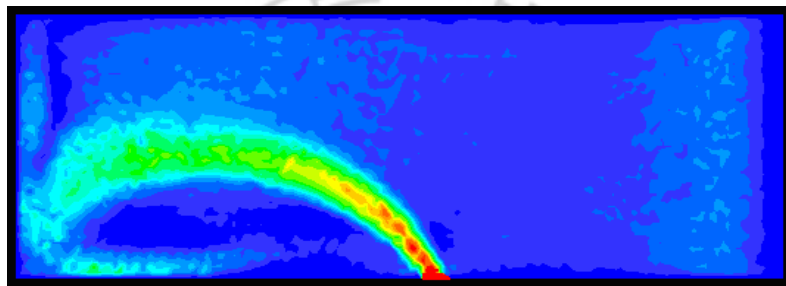
由前一節所得到之結果看來，操作在高掃流速度下可以抑止濾餅之生成，進而達到提高濾速之功效，但是提高掃流速度並非是最佳之操作條件，主要是提高掃流速度其所需的能量消耗也相對的提高，並不符合經濟上的考量。另外，在膜面的受力情形上有一缺點是，剪應力隨著流動方向而衰退的相當快速，因此，本研究乃針對剪應力隨流動方向快速衰退之缺點，而將濾室內的流態加以改變，使剪應力衰退之部份能有所提升，來達到提升濾速之功效。基於以上的構思，所以在模擬計算上將濾室內部之構造加以改變，其改變方式為在剪應力衰減之區域引入另一道物流，來提升剪應力的大小。相同的，仍使用單一相(水相)作流態模擬分析，則圖 5-15 為不同側流比例之膜面速度分佈圖，其中，圖 5-15(a) 為一般掃流方式，其掃流速度為 0.1 m/sec(單位時間內之體積流率為 6 g/sec)；圖 5-15(b) 為有側流之掃流方式，掃流速度仍維持 0.1 m/sec，而



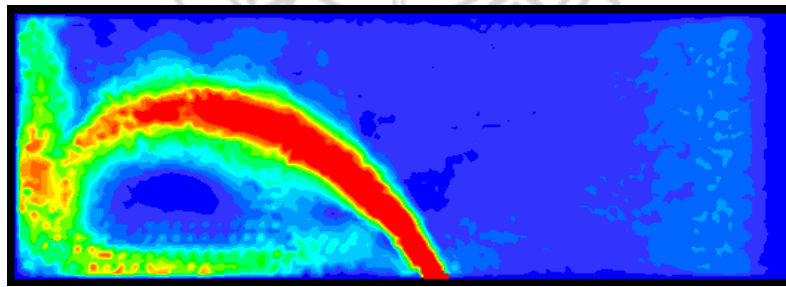
(a) $v=0.1\text{m/sec}(6\text{g/sec})$



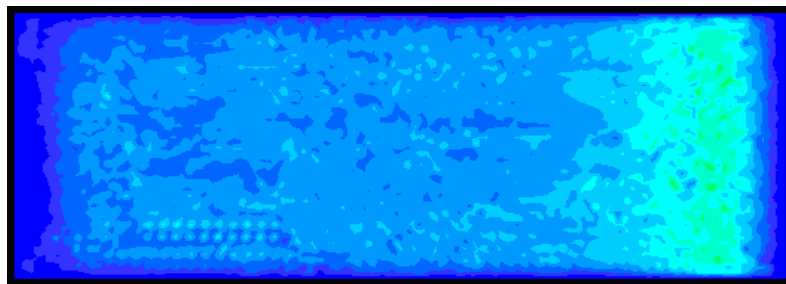
(b) $(6\text{g/sec} : 0.6\text{g/sec})$



(c) $(6\text{g/sec} : 3\text{g/sec})$



(d) $(6\text{g/sec} : 6\text{g/sec})$



(e) $v=0.2\text{m/sec}(12\text{g/sec})$

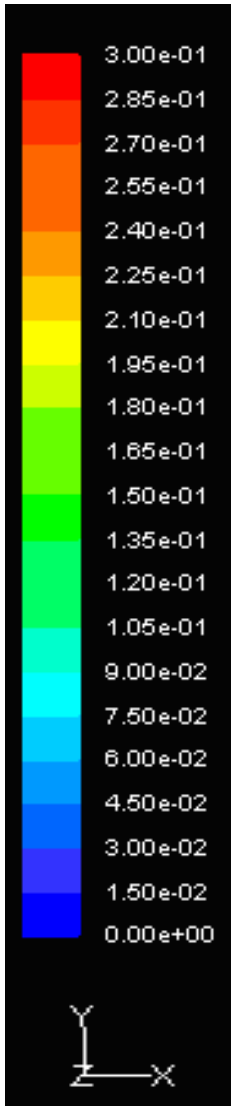


圖 5-15 不同側流比例之膜面速度分佈圖($\Delta P=50\text{ kPa}$, $C=0.2\text{ wt\%}$)

在側端有一進口物流(0.6 g/sec)；相同的，圖 5-15(c) 為有側流之掃流過濾，掃流速度維持 0.1 m/sec 以及側端物流為 3 g/sec；圖 5-15(d) 為有側流之掃流過濾，掃流速度維持 0.1 m/sec 以及側端物流為 6 g/sec；最後，圖 5-15(e) 為一般掃流方式，其掃流速度為 0.2 m/sec(單位時間內之體積流率為 12 g/sec)。在以上敘述中，圖 5-15(d) 與圖 5-15(e) 兩者輸送至濾室內的質量流率相等。由圖 5-15 中的各圖可以看出，有無側流之間速度分佈之差異，以及隨著側端物流的質量流率增加而造成膜面上之流態有所變化。從圖 5-15(a) 與圖 5-15(e) 之間的比較看來，確實增加進口端之速度可提升膜面整體的速度分佈值；另外，從圖 5-15(b)、圖 5-15(c) 與圖 5-15(d) 之間的比較看來，當增加側端物流的質量流率相對的會提高側端物流之進口速度，進而影響膜面上之流態，其中，以圖 5-15(d) 影響的範圍最為寬廣。

在有側流之膜面速度變化探討結束後，針對有側流之膜面受力分佈加以分析，圖 5-16 為不同側流比例下膜面剪應力值之比較($\Delta P=50$ kPa, $C=0.2$ wt%)。相同的，流體流經膜面的全長為 5.5 cm，由於進口端效應以及出口端效應的影響，因此在 0.825 cm 之前以及 4.675 cm 之後的區域其數據值不予採用。由圖中可以看到，在一般掃流方式(0.1 m/sec 與 0.2 m/sec)下，膜面上的剪應力大小會隨著掃流距離而逐漸減小，而約在 1.925 cm 之後，其剪應力大小變化不大，因此，粒子可能會堆積在此區域當中，所以，在此將濾室的側端引進另一道物流來提升此區域的剪應力值，進而減少此區域的

粒子累積量。由不同側流比例[$v=0.1$ m/sec (6 g/sec)、(6 g/sec : 0.6 g/sec)、(6 g/sec : 3 g/sec)、(6 g/sec : 6 g/sec)]下之剪應力比較看來，當側端引進另一道物流時，在原先粒子容易累積之區域(1.925 cm 之後)上，其膜面上的剪應力值都有所增加，並且，其剪應力大小隨側端物流的質量流率增加而增加。

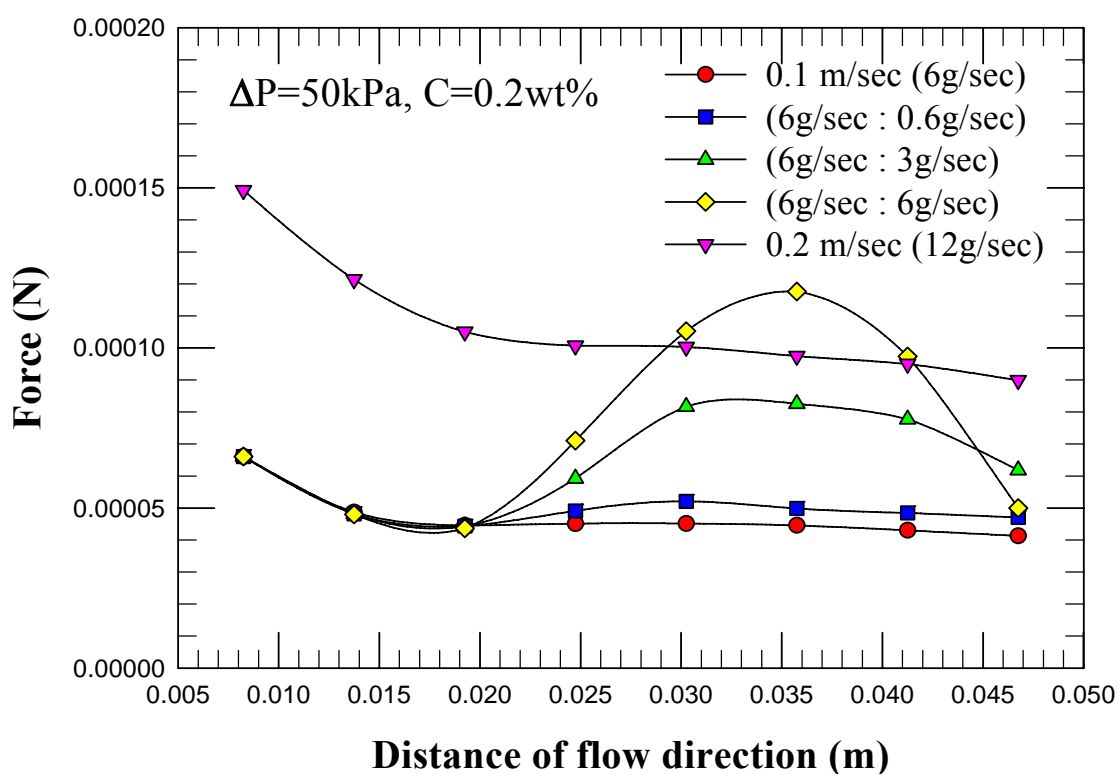


圖 5-16 不同側流比例下膜面剪應力值之比較($\Delta P=50$ kPa, $C=0.2$ wt%)

接下來，針對一般掃流方式和有側流之掃流方式加以比較說明，在同種操作條件下，增加側端物流的質量流率的确會提昇整體的剪應力大小，然而，將 0.2 m/sec(12 g/sec)與(6 g/sec : 6 g/sec)兩者之間作比較，可以看出當操作在 0.2 m/sec(12 g/sec)時整體的剪應力值較(6 g/sec : 6 g/sec)為大，但是

在 3.025 cm 與 4.125 cm 之間的剪應力值則以(6 g/sec : 6 g/sec)較大，因此，推測在此區域內的粒子堆積量因該會以 0.2 m/sec(12 g/sec)較多。

已藉由模擬計算出一般掃流方式與側流掃流方式之間的流態變化，並將膜面上受力分佈情形加以分析討論，相同的，吾人仍將實驗結束後之濾餅分佈情形加以拍攝，與計算出之受力變化相互對應，如圖 5-17 所示，其中，圖 5-17(a)與圖 5-17(e) 分別為掃流速度 0.1 m/sec(6 g/sec)與 0.2 m/sec(12 g/sec)之膜面濾餅分佈情形，然後隨著側端物流的質量流率增加而濾餅分佈情形的變化如圖 5-17(b)、圖 5-17(c)以及圖 5-17(d) 所示，由以上圖中可以觀察到，操作在高掃流速度 0.2 m/sec(12 g/sec)下，其膜面上濾餅生成的量較低掃流速度 0.1 m/sec(6 g/sec)的少，並且可以看出粒子較容易累積在流動方向的中間區域上；接著，觀察有側流之膜面上濾餅分佈的情形，可以看出當側端物流的質量流率較高時，則側端物流流經之區域，粒子堆積量較少，由此可以看出，側流可以減少粒子在中間區域的累積，尤其以(6 g/sec : 6 g/sec)之條件下最為明顯。由以上敘述可以看出實驗結果與模擬分析出的結果相互驗證。



(a) $\Delta P=50$ kPa, $C=0.2$ wt%, $v=0.1$ m/sec (6 g/sec)



(b) $\Delta P=50$ kPa, $C=0.2$ wt%, $v=0.1$ m/sec (6 g/sec : 0.6 g/sec)



(c) $\Delta P=50$ kPa, $C=0.2$ wt%, $v=0.1$ m/sec (6 g/sec : 3 g/sec)



(d) $\Delta P=50$ kPa, $C=0.2$ wt%, $v=0.1$ m/sec (6 g/sec : 6 g/sec)



(e) $\Delta P=50$ kPa, $C=0.2$ wt%, $v=0.2$ m/sec (12 g/sec)

圖 5-17 不同側流比例下膜面濾餅分佈之比較($\Delta P=50$ kPa, $C=0.2$ wt%)

5-5 有側流之掃流過濾實驗數據分析

從模擬計算之結果可以得到，在濾室的側端注入另一道物流可以改變膜面上之受力分佈，並影響其粒子堆積的情形。因此，針對實驗所得到之濾速衰減變化加以分析討論。在側流之掃流實驗中，主要探討不同過濾壓差

下，操作在各種側流比例之差異，以及分析過濾效果是否有所提升。圖 5-18 為不同過濾壓差下各側流比例之濾速變化情形，其中，圖 5-18(a) 為在懸浮液濃度 0.2 wt%、過濾壓差 25 kPa 下各側流比例之濾速衰退情形；圖 5-18(b) 為在懸浮液濃度 0.2 wt%、過濾壓差 50 kPa 下各側流比例之濾速衰退情形；圖 5-18(c) 為在懸浮液濃度 0.2 wt%、過濾壓差 75 kPa 下各側流比例之濾速衰退情形。由圖中可以看到，在三種過濾壓差下，不同側流比例對濾速均有所影響，當側端物流的質量流率提升時，其濾速衰減程度較為緩慢，以(6 g/sec : 6 g/sec)最為明顯。另外，在前面探討受力分析時，有將(6 g/sec : 6 g/sec)與 0.2 m/sec(12 g/sec)兩種操作條件下的結果加以討論，發現剪應力在流動方向的中間區域上(6 g/sec : 6 g/sec)較 0.2 m/sec(12 g/sec)為高，並且由濾餅分佈情形可以看到，中間區域確實因為剪應力值較大而濾餅堆積較少。所以，在這裡將濾速衰減變化情形與濾餅堆積情形加以對照，可發現由於膜面中間區域上的濾餅堆積較少，因此，造成(6 g/sec : 6 g/sec)濾速衰減的程度較 0.2 m/sec(12 g/sec)為緩慢。其中，在過濾壓差為 25 kPa 時，由於膜面上堆積的粒子較少，因

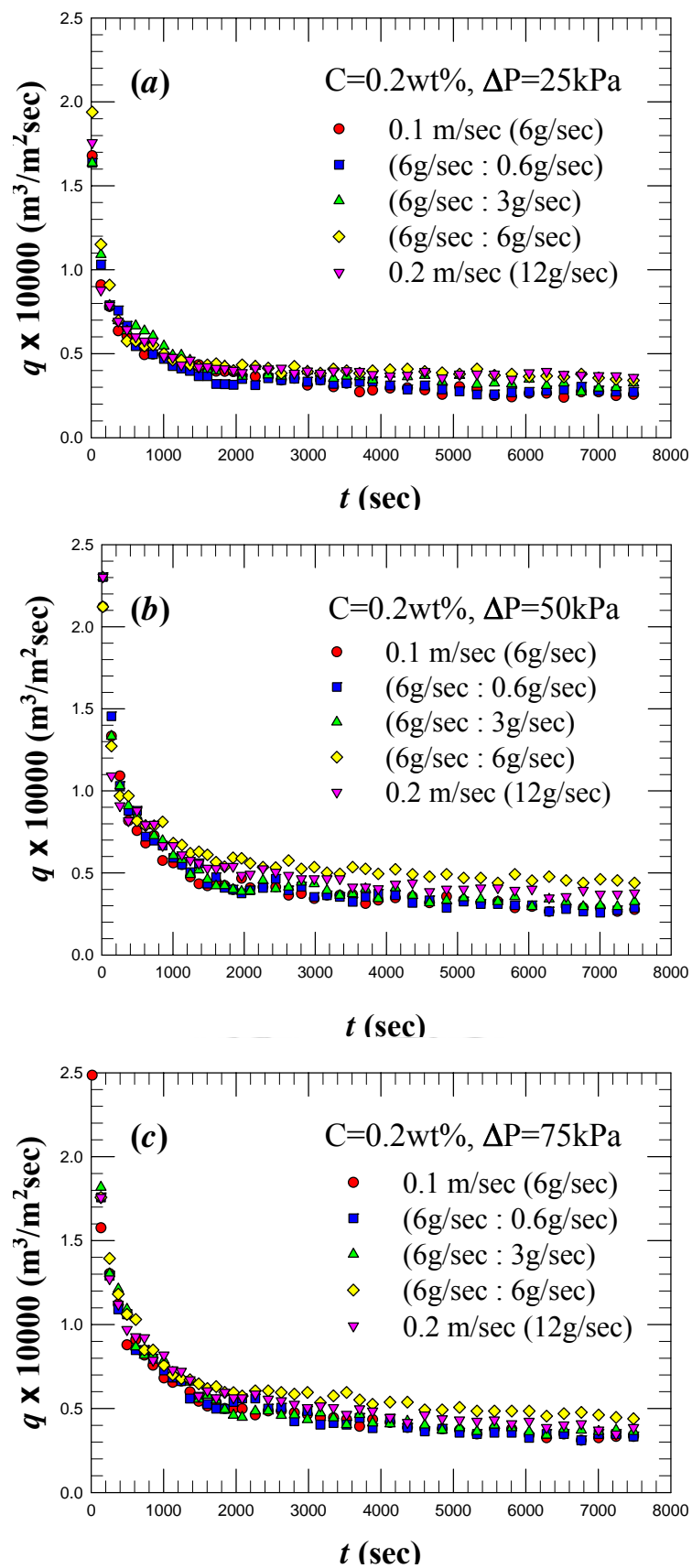


圖 5-18 不同過濾壓差下各側流比例之濾速變化情形

此側流對膜面中間區域上粒子沖刷的效果較差，所以造成各種側流比例下，彼此間的濾速衰減情形差異不大。

在不同過濾壓差下，各側流比例的濾速變化探討結束後，針對各條件下的穩定濾速加以分析，圖 5-19 為不同側流比例下穩定濾速與過濾壓差之比較，從圖中可以看到，各側流比例的穩定濾速均隨著過濾壓差增加而增加；並且穩定濾速也隨著側端物流的質量流率增加而有所增加，濾速會有所增加的原因，主要因為側端物流的質量流率增加相對的會提高膜面的剪應力大小，使粒子不易堆積在膜面上，進而提升濾速值。其中，(6 g/sec : 0.6 g/sec) 的穩定濾速值與 0.1 m/sec(6 g/sec) 的差異並不大，主要的原因是(6 g/sec : 0.6 g/sec) 的側端物流質量流率較小，因此，對膜面的剪應力值增幅較少，所以穩定濾速只有些許之提升。另外，在(6 g/sec : 6 g/sec)與 0.2 m/sec(12 g/sec) 之穩定濾速比較上，可以看出(6 g/sec : 6 g/sec)之穩定濾速值較大。

接下來，因為側端物流的質量流率不同，而造成中間區域的剪應力值有所差異，因此在各條件下的濾餅重也會有所差異，圖 5-20 為不同側流比例下濾餅重與過濾壓差之比較，從圖中可以看到，各側流比例的濾餅重均隨著過濾壓差增加而增加；然而，濾餅重隨著側端物流的質量流率增加而逐漸減少，濾餅量之所以會減少的原因，相同的，主要因為側端物流的質量流率增加相對的會提高膜面的剪應力大小，使粒子不易堆積在膜面上，所以濾餅重較小。另外，在(6 g/sec : 6 g/sec)與 0.2 m/sec(12 g/sec)之濾餅重比

較上，可以看出(6 g/sec : 6 g/sec)之濾餅重較小。

膜面上粒子堆積形成的濾餅型態，會直接影響到過濾的阻力大小，在此同樣使用過濾的理論公式，式(2.21)，來得到過濾總阻力值之大小，經整理由圖 5-21 所示，由圖中可以看到，各側流比例的過濾總阻力均隨著過濾壓差增加而增加；然而，過濾總阻力隨著側端物流的質量流率增加而逐漸減少，過濾總阻力之所以會減少的原因，主要因為膜面上粒子堆積的量，會因側端物流質量流率增加而提升膜面的剪應力，造成粒子不易堆積，使堆積的粒子量較少，因此，過濾總阻力也會減少。另外，同樣的將(6 g/sec : 6 g/sec)與 0.2 m/sec(12 g/sec)之過濾總阻力加以比較，可以看出(6 g/sec : 6 g/sec)之過濾總阻力較小。

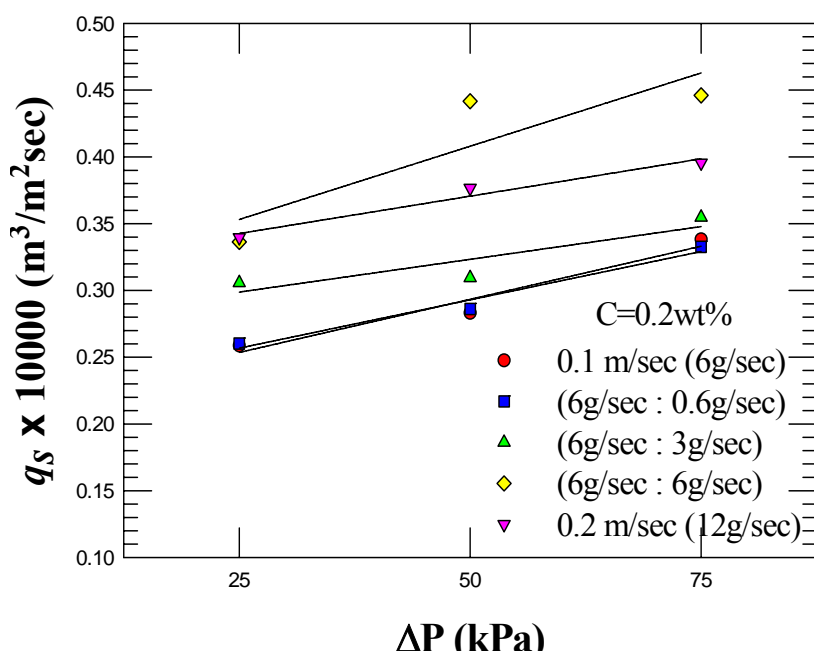


圖 5-19 不同側流比例下穩定濾速對過濾壓差作圖

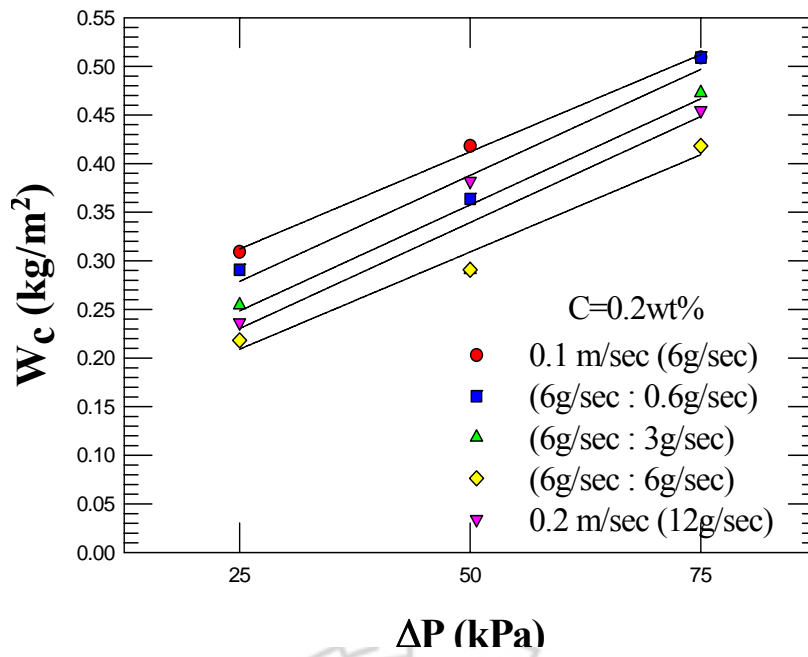


圖 5-20 不同側流比例下濾餅重對過濾壓差作圖

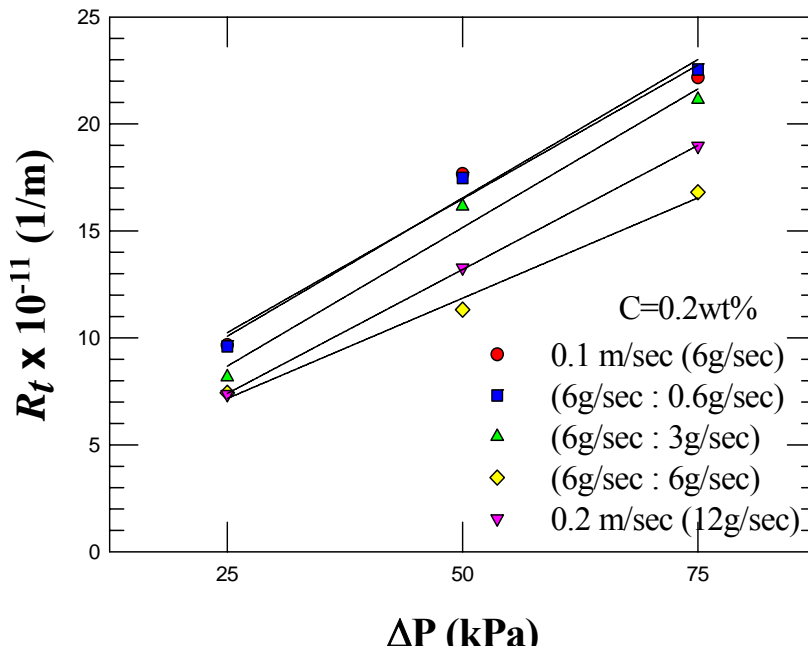


圖 5-21 不同側流比例下過濾總阻力對過濾壓差作圖

5-6 有側流之掃流過濾阻力模擬分析

同樣的，從有側流之掃流過濾實驗結束後的膜面濾餅分佈情形看來，發現膜面上濾餅分佈確實會受側流之影響，因此為了更加詳細的探討有側流之掃流過濾中，不同側流比例與整體過濾阻力之間的關係，所以在此使用 FLUENT 作模擬分析。在計算上，主要也是依據實驗所得到之數據而加以分析模擬，針對各種側流比例下的濾速衰減變化作擬穩態之模擬，進而得到濾速與過濾總阻力之關係。

對過濾總阻力之模擬方法，與前面 5-2 節所敘述之方式相同，首先，將各側流比例下要分析的濾速衰減圖，做趨勢線的回歸運算，所以濾速衰減圖經回歸處理，可以得到由濾速對時間作圖之回歸曲線，如圖 5-22 所示，由圖中可以看到在各側流比例下的實驗數據回歸曲線($\Delta P=50$ kPa)。當各側流比例下的回歸曲線繪製完成後，在本研究中乃針對濾速隨時間衰減之變化作擬穩態模擬，因此在濾速衰退的回歸曲線上，取出不同時間點所對應之濾速值(q_t)，作為擬穩態模擬之分析點，如圖 5-22 所示。接下來，相同的將各側流比例下的回歸曲線分別作分析，在各曲線中的 q_t 值經換算後，可以得到回流端 $v_{recycle}$ 之速度值，即式(4.4b)，接著在 FLUENT 程式中設定回流端 $v_{recycle}$ 之速度值以及 β 值，其運算的方式為將 $v_{recycle}$ 之速度值以及 β 值代入式(4.3)當中，然後求解式(4.2)~(4.4)，等待數值運算收斂後，針對多孔性介質之薄膜的上下層作過濾壓差之計算。

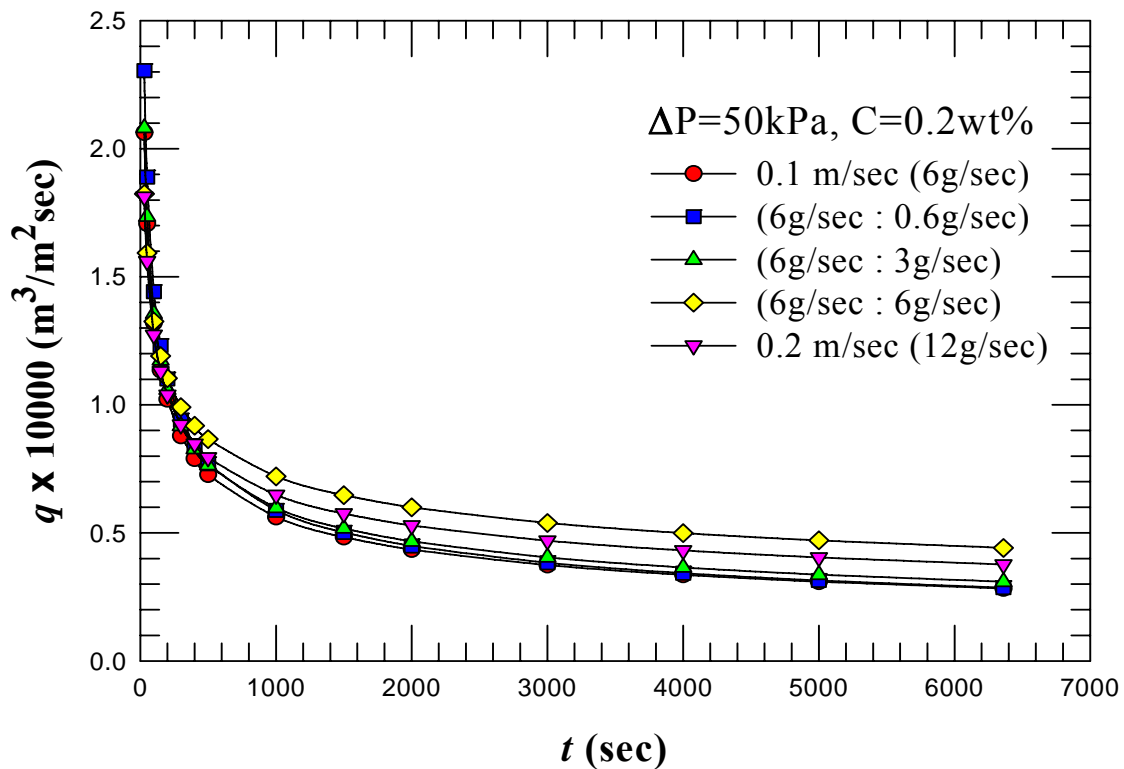


圖 5-22 不同側流比例下實驗數據的回歸曲線之呈現($\Delta P=50$ kPa)

利用 try-and-error 的方式改變不同 β 值，直到計算出多孔性薄膜上下層的壓差為設定值，則當 β 值確定後，將 β 值換算成整體總阻力 R_t [即，式(2.21)所稱 $R_t = R_c + R_{cp} + R_{if} + R_m$ ，其中， R_c 為濾餅阻力、 R_{cp} 為濃度極化層所造成之阻力、 R_{if} 為薄膜內部阻塞所造成之阻力以及 R_m 為乾淨薄膜之阻力。]，此時在擬穩態模擬過程中之一時間點的模擬已完成。在不同時間上濾速及過濾總阻力的模擬方式如同上述之步驟，因此，經由此方式我們可以得到濾速與過濾總阻力隨時間之變化，如圖 5-23 所示，圖 5-23 為定過濾壓差(50 kPa)與定懸浮液濃度(0.2 wt%)下，不同側流比例之濾速與過濾總阻力的模擬比較，從圖中可以看到，在濾速衰減之回歸曲線上，各點 q_t 值會相對應出

R_t 值， R_t 值會隨濾速衰減而逐漸增大，另外，由圖

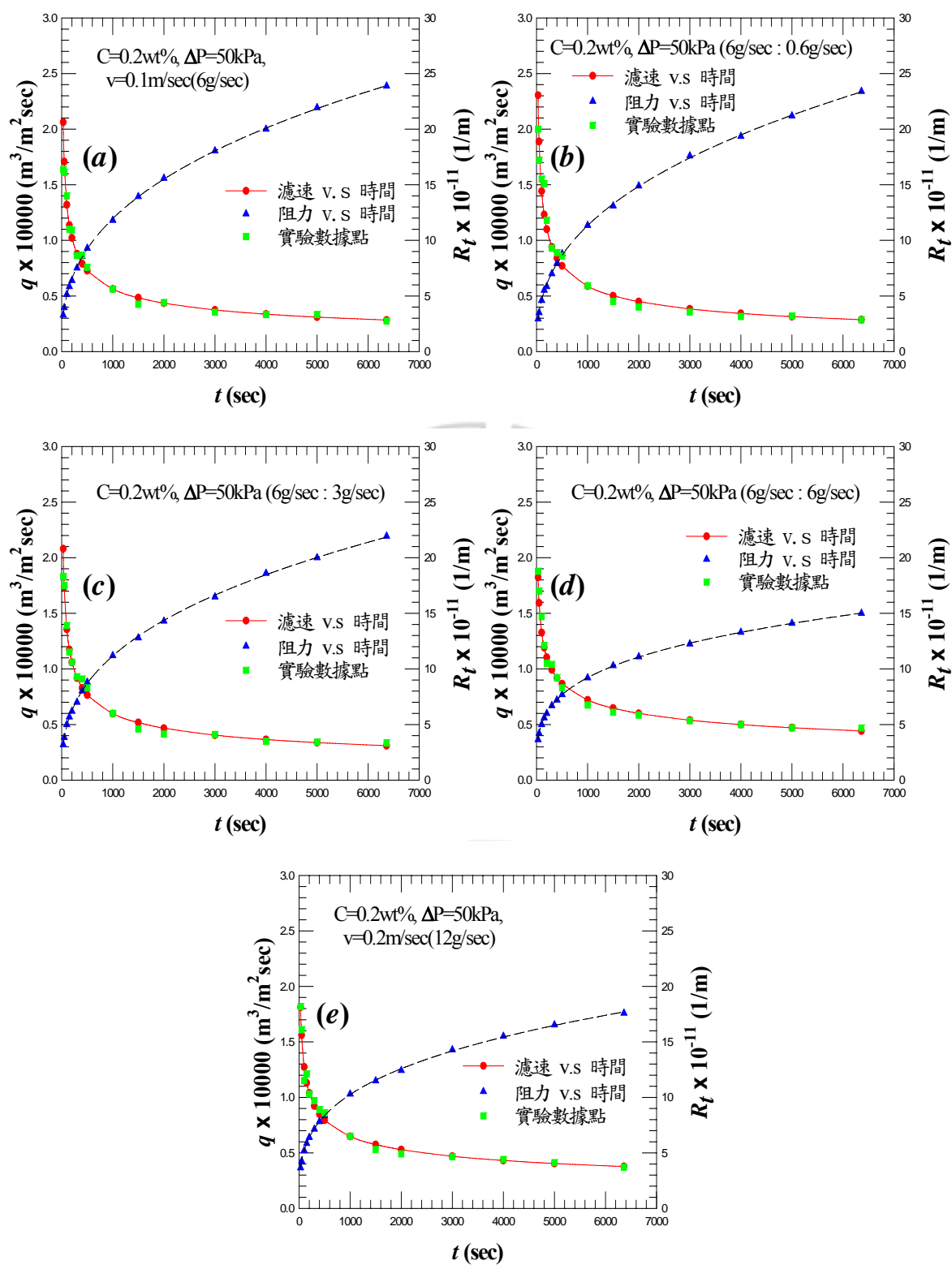


圖 5-23 各側流比例下濾速與過濾總阻力隨時間變化之模擬($\Delta P=50 \text{ kPa}$)

5-23(a)~5-23(e) 可以觀察出當側端物流的質量流濾增加時，擬穩態中的過濾總阻力各點會隨之減少。

當在各種側流比例下的濾速衰減變化已模擬完成，並得到濾速與過濾總阻力之關係後，接下來，將各側流比例下過濾總阻力隨時間變化之關係加以比較說明，圖 5-24 為在不同側流比例下過濾總阻力隨時間變化之模擬比較($\Delta P=50$ kPa) (同樣的，在此 R_t 所代表之意義為 $R_t = R_c + R_{cp} + R_{if} + R_m$ ，其各別之定義如同前面所敘。)。由圖 5-24 可以看出，當定過濾壓差(50 kPa)、定懸浮液濃度(0.2 wt%)下，側端物流的質量流率增加其擬

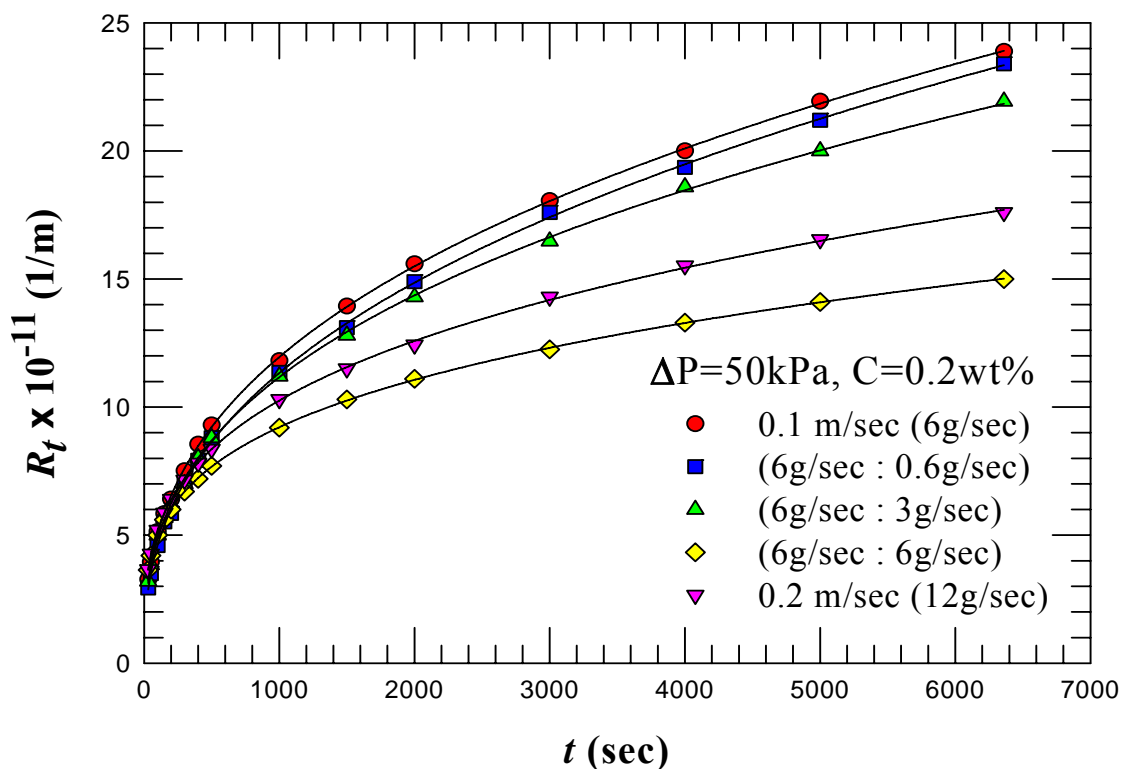


圖 5-24 不同側流比例下過濾總阻力隨時間變化之模擬比較($\Delta P=50$ kPa)

穩態中的過濾總阻力各點會隨之減少。其中，將(6g/sec : 6g/sec)與 0.2 m/sec

(12g/sec)加以比較，可以看出(6g/sec : 6g/sec)的過濾總阻力較小，此結果與前一節實驗所得到之過濾總阻力的結果相符。

以上所闡述的內容為操作在過濾壓差 50 kPa、懸浮液濃度 0.2 wt% 下，不同側流比例之模擬比較，由以上模擬之結果，我們可以得到濾速衰退過程中之擬穩態的過濾總阻力變化。然而，操作在懸浮液濃度 0.2 wt%、過濾壓差 25 kPa 以及 75kPa 下，不同側流比例之模擬比較，由圖 5-25~圖 5-30 所示，其模擬分析的方式與過濾壓差為 50 kPa 下的模擬內容相同。其中，圖 5-25 與圖 5-26 分別為不同側流比例下實驗數據的回歸曲線之呈現($\Delta P=25$ kPa、 $\Delta P=75$ kPa)，由圖中可以看到在這兩過濾壓差下，其濾速均會隨著側端物流質量流率增加而增加；圖 5-27 與圖 5-28 分別為不同側流比例之濾速與過濾總阻力的模擬比較($\Delta P=25$ kPa、 $\Delta P=75$ kPa)，由圖中可以觀察出，在這兩過濾壓差下，當側端物流的質量流濾增加時，擬穩態中的過濾總阻力各點會隨之減少；圖 5-29 與圖 5-30 分別為不同側流比例下過濾總阻力隨時間變化之模擬比較($\Delta P=25$ kPa、 $\Delta P=75$ kPa)，從圖中可以看到，操作在 75kPa 時，其不同側流比例下過濾總阻力隨時間變化之趨勢，與操作在 50kPa 時相符；而操作在 25 kPa 時，其不同側流比例下過濾總阻力隨時間變化之趨勢，與 50kPa 及 75kPa 有所差異，主要的差異在(6g/sec : 6g/sec)與 0.2 m/sec (12g/sec)的比較上，兩者的區分較不明顯。

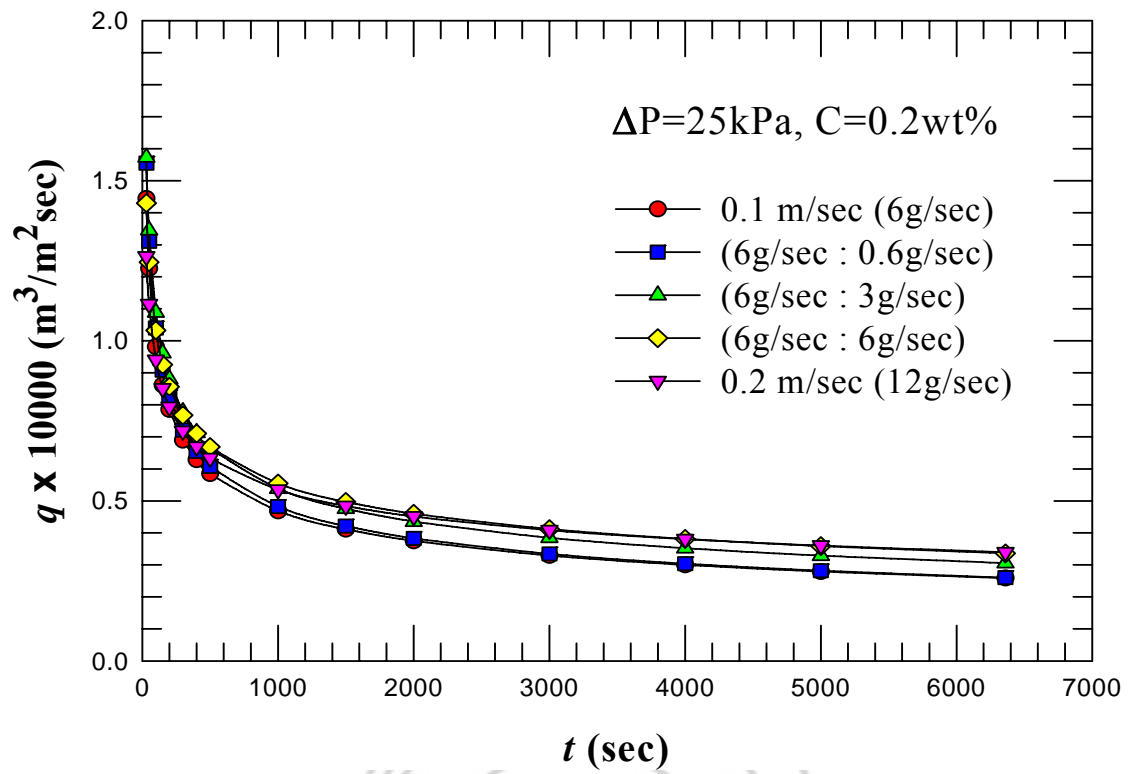


圖 5-25 不同側流比例下實驗數據的回歸曲線之呈現($\Delta P=25 \text{ kPa}$)

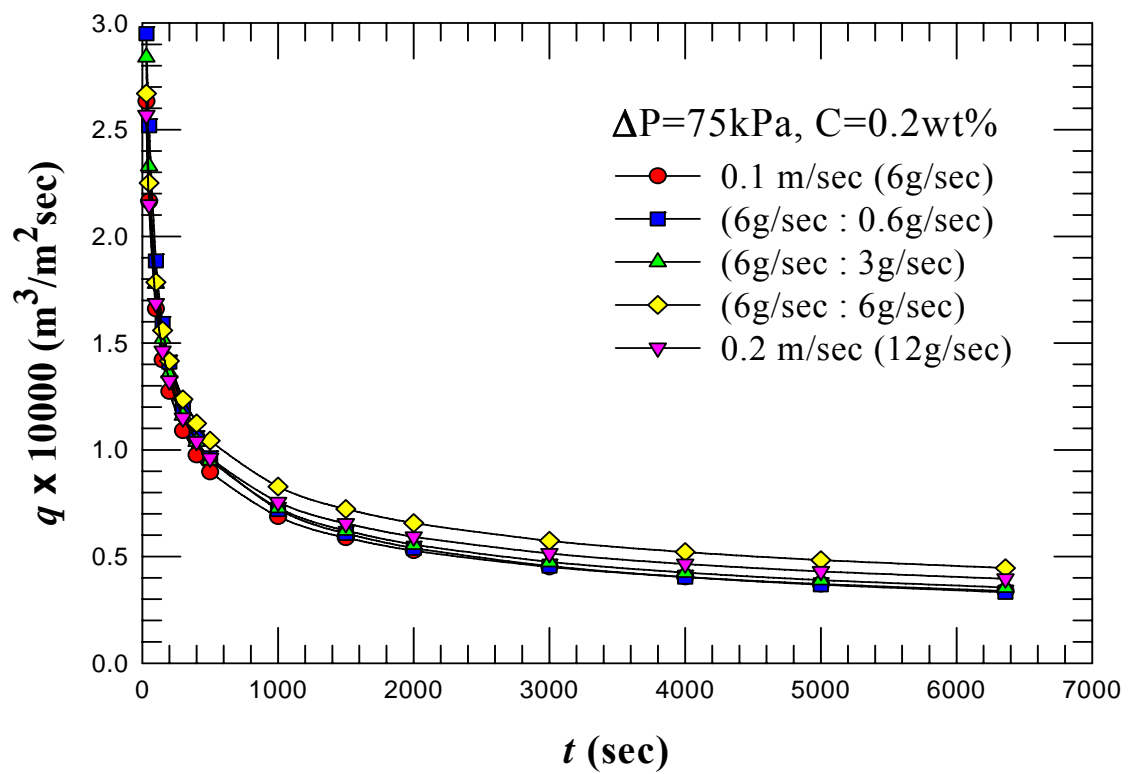


圖 5-26 不同側流比例下實驗數據的回歸曲線之呈現($\Delta P=75 \text{ kPa}$)

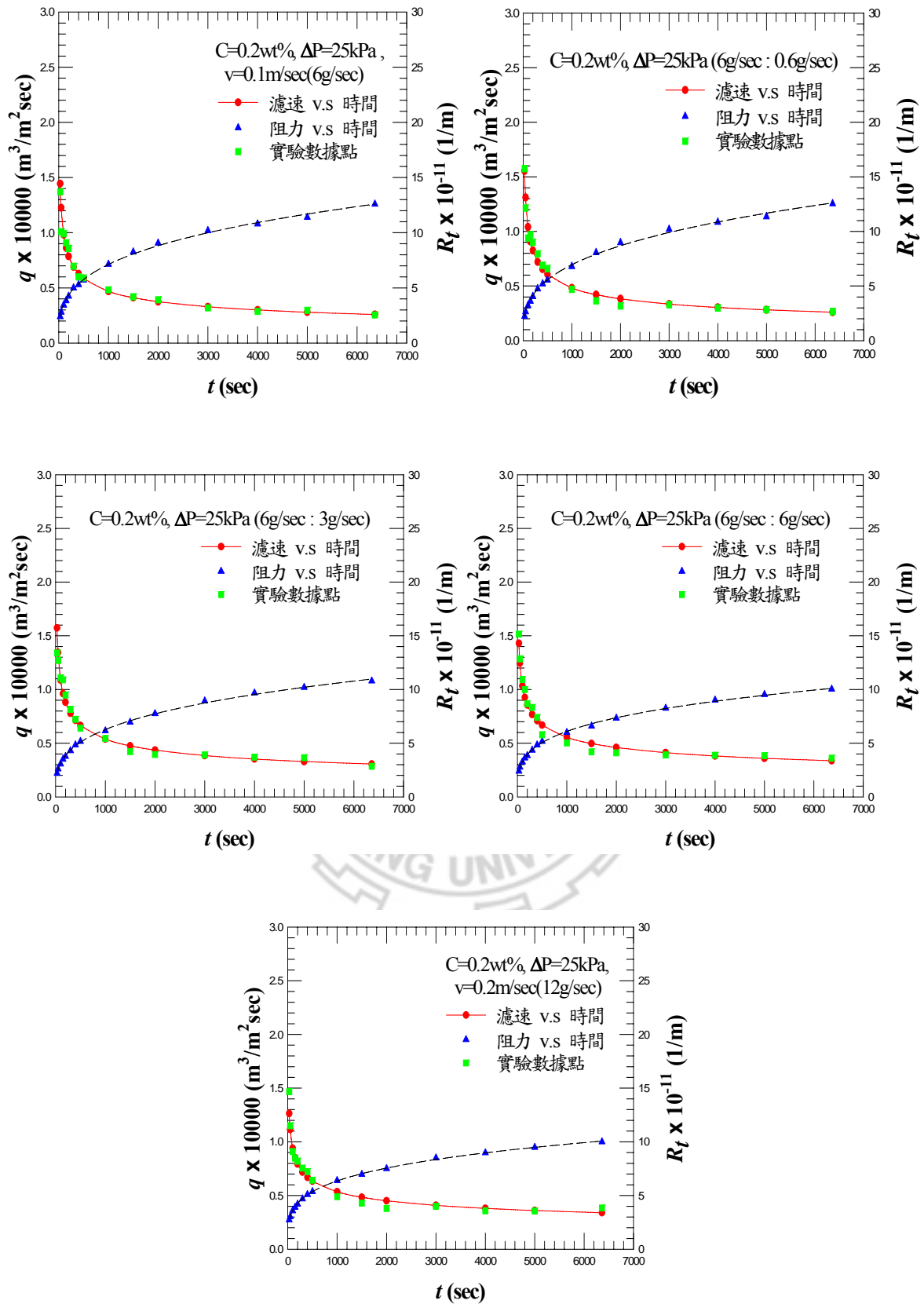


圖 5-27 各側流比例下濾速與過濾總阻力隨時間變化之模擬($\Delta P=25\text{ kPa}$)

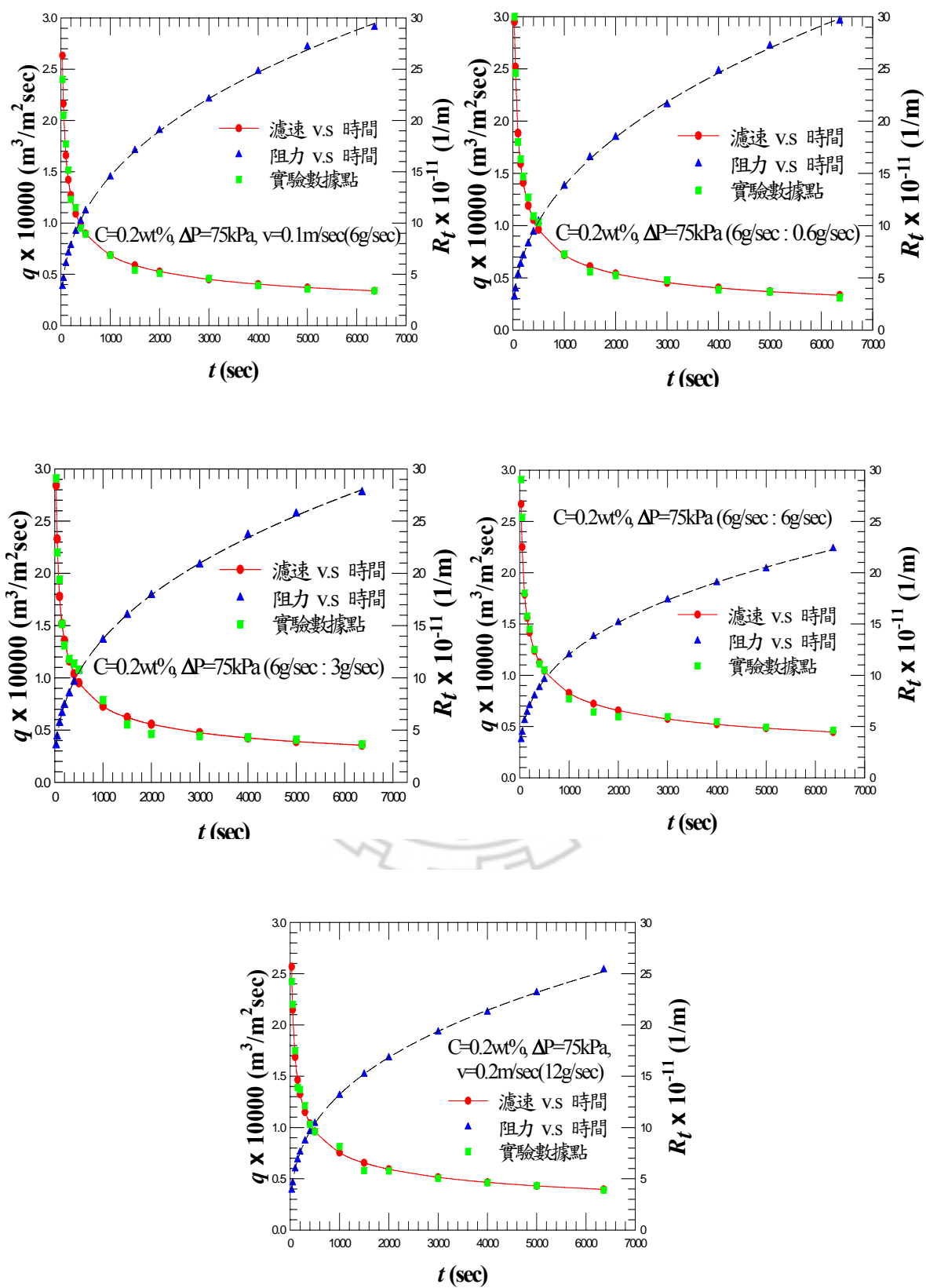


圖 5-28 各側流比例下濾速與過濾總阻力隨時間變化之模擬($\Delta P=75 \text{ kPa}$)

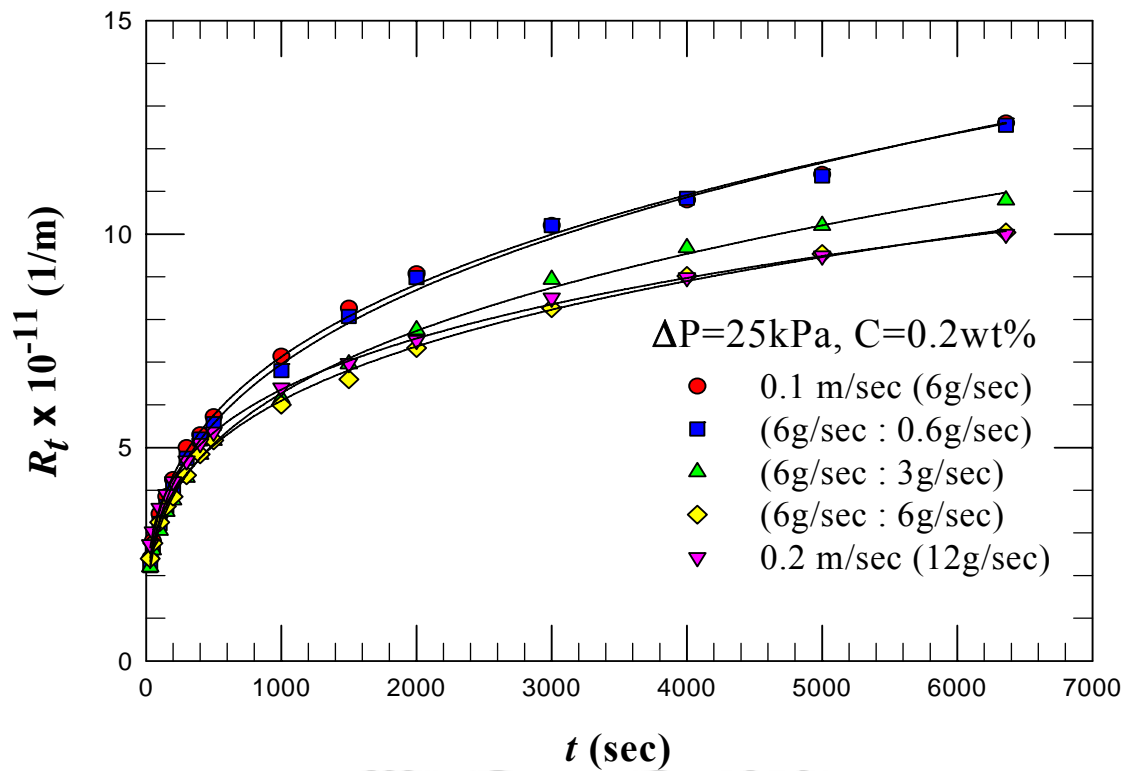


圖 5-29 不同側流比例下過濾總阻力隨時間變化之模擬比較($\Delta P = 25 \text{ kPa}$)

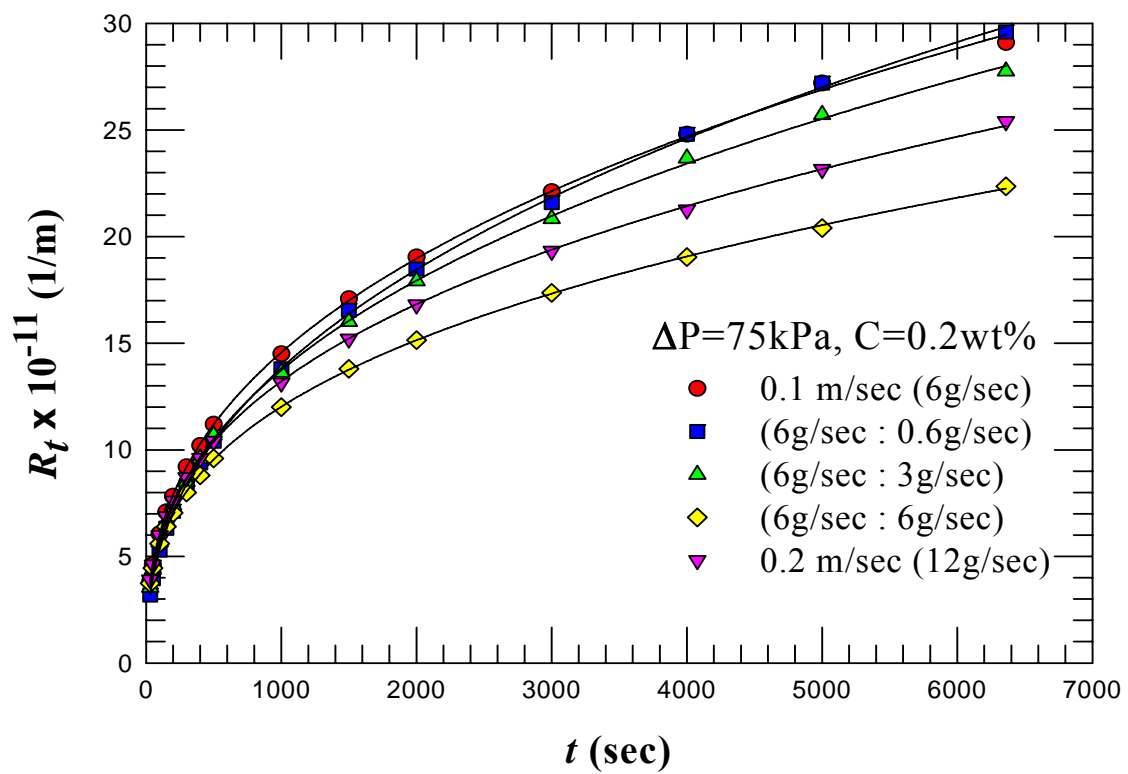


圖 5-30 不同側流比例下過濾總阻力隨時間變化之模擬比較($\Delta P = 75 \text{ kPa}$)

5-7 濾餅形成之動態分析

在掃流膜過濾中，懸浮粒子會隨著時間增加而在膜面上逐漸堆積成濾餅，在粒子堆積的同時，濾餅層的厚度會逐漸增加，進而影響到濾餅的重量。隨著濾餅漸漸的形成，其粒子與粒子之間的疏密程度也會有所改變，粒子之間疏密程度的不同，即代表濾餅層內部的孔隙度有所差異。在本研究中乃針對掃流膜過濾實驗中，不同過濾時間之濾餅重(W_c)、濾餅層厚度(L_c)與濾餅層的平均孔隙度(ϵ_{av})作動態分析，圖 5-31 為濾餅重、濾餅層厚度與濾餅平均孔隙度隨時間之變化，由圖中得知，濾餅的重量

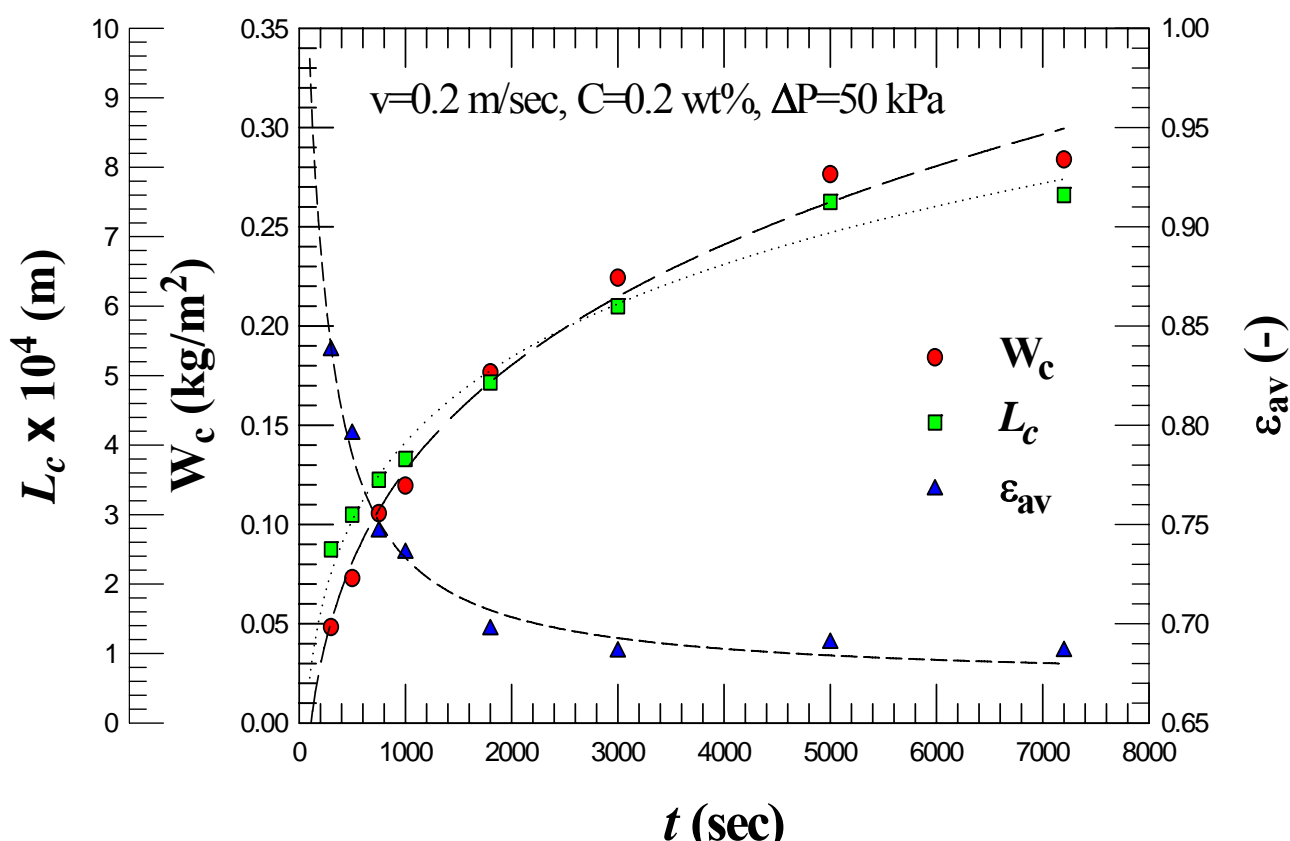


圖 5-31 濾餅重、濾餅層厚度與濾餅平均孔隙度隨時間之變化

隨著時間的增加而增加；濾餅層厚度隨著時間的增加而增加；濾餅平均孔隙度隨著時間的增加而減少。另外，由圖中可以見到，在過濾初期時($t=0\text{sec}\sim t=1800\text{sec}$)，濾餅重量與濾餅層厚度快速的增加以及濾餅的平均孔隙度快速的減少，其主要的原因是在過濾初期時，膜面上粒子累積的數量較少，相對的過濾阻力也較少，所以粒子會迅速的累積在膜面上；然而膜面上的濾餅平均孔隙度會隨著粒子快速的累積在膜面上而迅速的減少，當粒子累積至某程度時，粒子與粒子之間會受到擠壓而變得更加緻密，因此使濾餅之孔隙度減少。隨著時間的增加($t=3000\text{sec}\sim t=7200\text{sec}$)，則膜面上濾餅層的厚度漸漸趨於穩定，濾餅的重量也逐漸趨於平穩，相對的濾餅平均孔隙度的變化也較為平緩。

圖 5-32 為在不同過濾時間下膜面濾餅堆積的情形，從圖中可以看到，在過濾初期時($t=100\text{sec}\sim t=500\text{sec}$)，膜面上濾餅堆積的情形較不明顯，可以看出濾餅堆積在膜面上的量較少；然而，隨著過濾時間的增加($t=500\text{sec}\sim t=5000\text{sec}$)，膜面濾餅堆積的情形逐漸明顯，而濾餅堆積在膜面上的量也漸漸的增加；最後在過濾的末期($t=5000\text{sec}\sim t=7200\text{sec}$)，由於膜面上濾餅堆積已趨於穩定狀態，因此，濾餅堆積在膜面上的量變化不大。

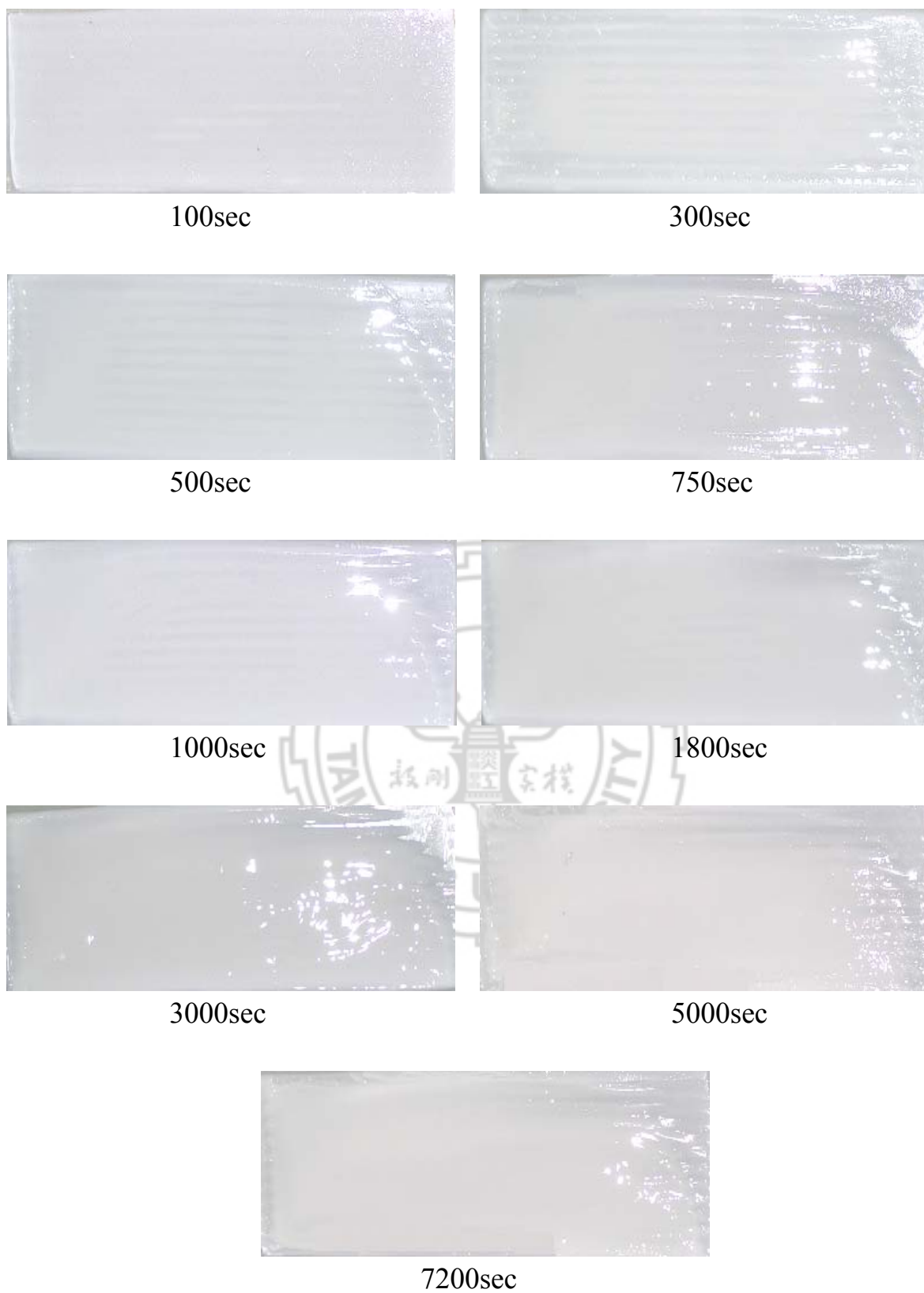


圖 5-32 不同過濾時間下膜面濾餅堆積的情形

($v=0.2$ m/sec, $C=0.2$ wt%, $\Delta P=50$ kPa)

在濾餅平均孔隙度的探討中，吾人將不同時間上的濾餅層取出，利用掃描式電子顯微鏡(SEM)加以拍攝，觀察其粒子堆積之情形，如圖 5-33 與圖 5-34 所示，其中，圖 5-33 為過濾時間 $t=500\text{sec}$ 之濾餅 SEM 拍攝圖($v=0.2\text{ m/sec}$, $C=0.2\text{ wt\%}$, $\Delta P=50\text{ kPa}$)、圖 5-34 過濾時間 $t=5000\text{sec}$ 之濾餅 SEM 拍攝圖($v=0.2\text{ m/sec}$, $C=0.2\text{ wt\%}$, $\Delta P=50\text{ kPa}$)。由圖中可以看出，在過濾初期時($t=500\text{sec}$)，粒子堆積較為鬆散，因此，其濾餅平均孔隙度較大；隨時間的增加而到過濾後期時($t=5000\text{sec}$)，粒子堆積較為緻密，所以其濾餅平均孔隙度較小。

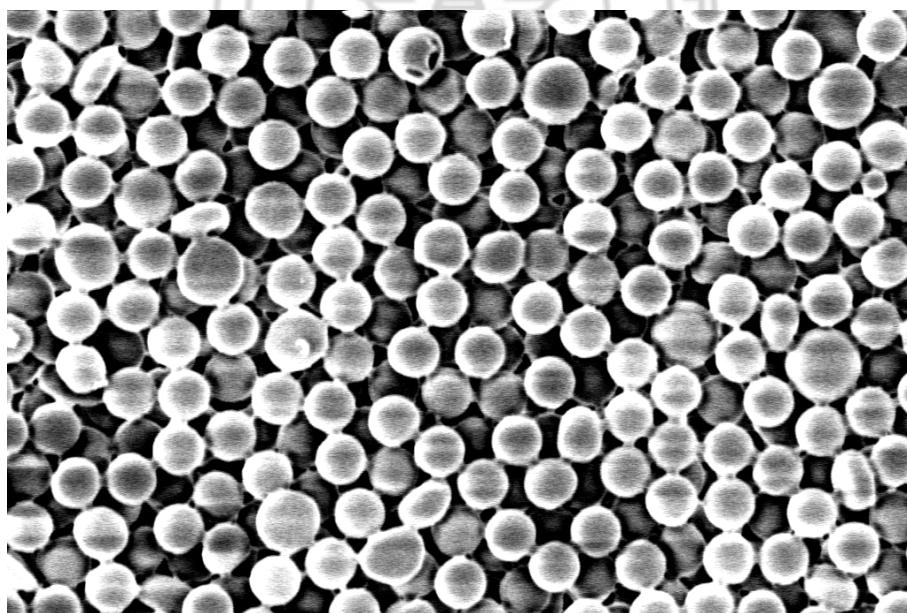


圖 5-33 過濾時間 $t=500\text{sec}$ 之濾餅 SEM 拍攝圖

($v=0.2\text{ m/sec}$, $C=0.2\text{ wt\%}$, $\Delta P=50\text{ kPa}$)

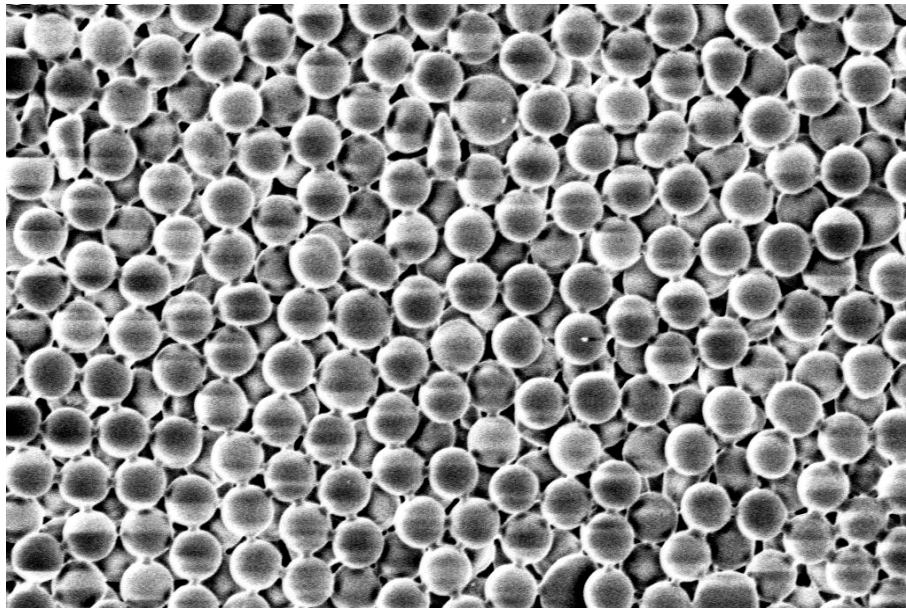
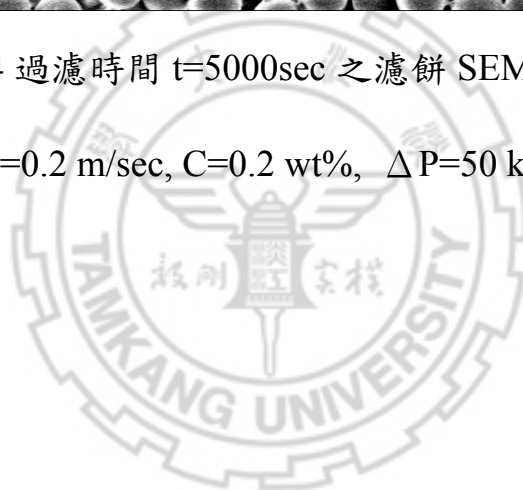


圖 5-34 過濾時間 $t=5000\text{sec}$ 之濾餅 SEM 拍攝圖

($v=0.2\text{ m/sec}$, $C=0.2\text{ wt\%}$, $\Delta P=50\text{ kPa}$)



在管式膜研究主要是以流體力學軟體模擬以及實驗探討管式膜過濾的特性以及粒子沈積的性質。其中，實驗部分採用單一粒徑之 PMMA 懸浮液，針對過濾阻力之生成與受力變化之情形加以研究分析，而可推估在長時間運轉下，不同操作條件所帶來之影響。並結合模擬，分析在不同操作條件下濾速之衰減情形，可對薄膜阻塞之趨勢得到更全面的瞭解，進而探討增加濾速以提高效能的方法。

5-8 操作條件對濾速之影響

為了瞭解管式膜過濾之操作條件如何影響過濾的結果，在實驗操作上分別改變不同懸浮液濃度、不同過濾壓差，以及不同掃流速度等條件進行管式膜過濾，以得到在不同操作條件下的濾速衰退情形。

5-8-1 懸浮液濃度對濾速之影響

在懸浮液濃度對濾速的影響方面，本研究採用固定過濾壓差及固定掃流速度下，探討不同的懸浮液濃度其濾速衰減的變化情形，如圖 5-35。從圖中可得知，當在低濃度之懸浮液下操作時，所得到的濾速值較高；當在高濃度之懸浮液下操作時，所得到的濾速值較低。操作在低懸浮液濃度下，之所以可得到較高濾速值，乃是因為低懸浮液濃度中的懸浮粒子較少，與膜面接觸的機率也較小，因此能夠沈積在膜面上的粒子較少，使得過濾的

阻力較小，進而濾速衰退的程度較少；相反的，操作在高懸浮液濃度下，由於懸浮液中的懸浮粒子較多，與膜面接觸的機率也相對較大，因此能夠沈積在膜面上的粒子較多，使得過濾的阻力較大，進而濾速衰退的程度較為嚴重。此外，由圖 5.1 中可觀察到，在固定過濾壓差為 50 kPa、掃流速度為 0.2 m/s 下，濾速隨著時間的增加而遞減，尤其是從過濾初期到過濾 600s 之間，濾速衰減的趨勢極大；600s 到 2000s 之間，濾速衰減的趨勢較為緩慢；2000s 之後，濾速則逐漸趨於穩定。更近一步的比較在 $C=0.1\text{ wt\%}$ 、 $C=0.3\text{ wt\%}$ ，與 $C=0.5\text{ wt\%}$ 三種濃度之懸浮液下操作，可發現在 600s 前之過濾過程中，濃度越高之懸浮液其濾速遞減的越快。

圖 5-36 為不同懸浮液濃度下過濾總阻力隨時間之變化情形，比較圖中高、低懸浮液濃度下之操作可明顯發現，在高濃度之懸浮液下操作時，過濾總阻力較高；而低濃度之懸浮液下操作時，過濾總阻力較低，且過濾總阻力之提升程度上高濃度之懸浮液下操作時較低濃度之懸浮液下操作時快。

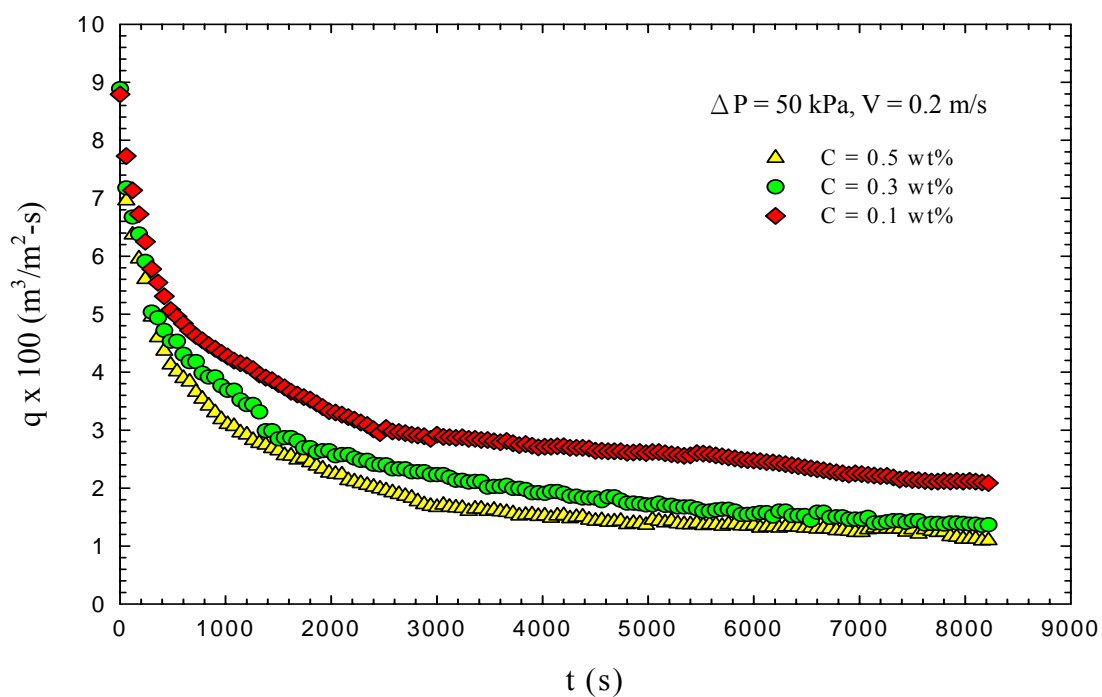


圖 5-35 定過濾壓差與定掃流速度下懸浮液濃度對濾速之影響

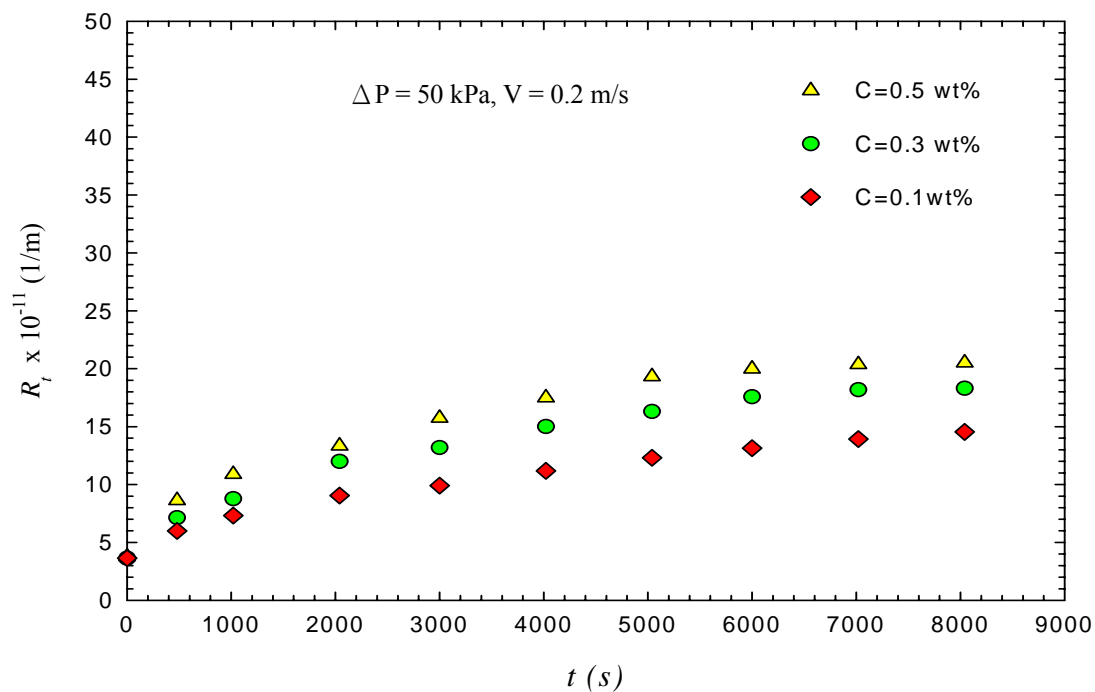


圖 5-36 不同懸浮液濃度下過濾總阻力隨時間之變化情形

5-8-2 過濾壓差對濾速之影響

在過濾壓差對濾速的影響方面，本研究採用固定懸浮液濃度及固定掃流速度，探討不同的過濾壓差之操作下其濾速衰減的變化情形，如圖 5-37。從圖中可得知，當在低過濾壓差下操作時，所得到的濾速值較低；當操作在高過濾壓差下操作時，所得到的濾速值較高。由於提高過濾壓差能夠增加水力施予膜面垂直方向之驅動力，進而促進懸浮液通過濾面，使得濾速值提升。因此，操作在低過濾壓差下所得的濾速值，較操作在高過濾壓差下所得的濾速值少，乃是因為低過濾壓差能夠增加垂直膜面的驅動力，較高過濾壓差小之緣故。此外，由圖中可觀察到，在固定懸浮液濃度為 0.3 wt%、掃流速度為 0.2 m/s 下，濾速隨著時間的增加而遞減，當過濾歷時 1400s 時，濾速則逐漸趨於穩定。

圖 5-38 為不同過濾壓差下過濾總阻力隨時間之變化情形，比較圖中 25 kPa、50 kPa，與 75 kPa 三種過濾壓差下之操作，可發現過濾總阻提升速度為 $75\text{ kPa} > 50\text{ kPa} > 25\text{ kPa}$ ，乃是因為儘管提高過濾壓差能夠增加水力施予膜面垂直方向之驅動力，但同時粒子亦更加容易沈積於膜面上，導致濾餅層之形成較低過濾壓差操作下快，所以過濾壓差越高其過濾總阻提升的越快。

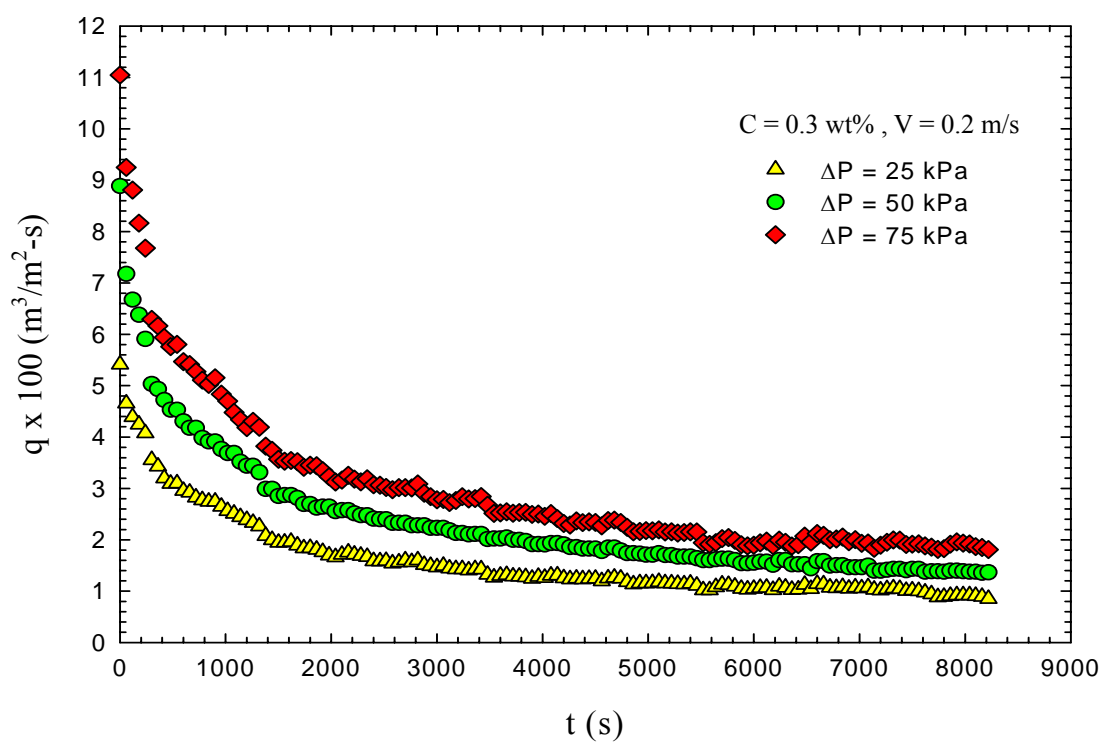


圖 5-37 定懸浮液濃度與定掃流速度下過濾壓差對濾速之影響

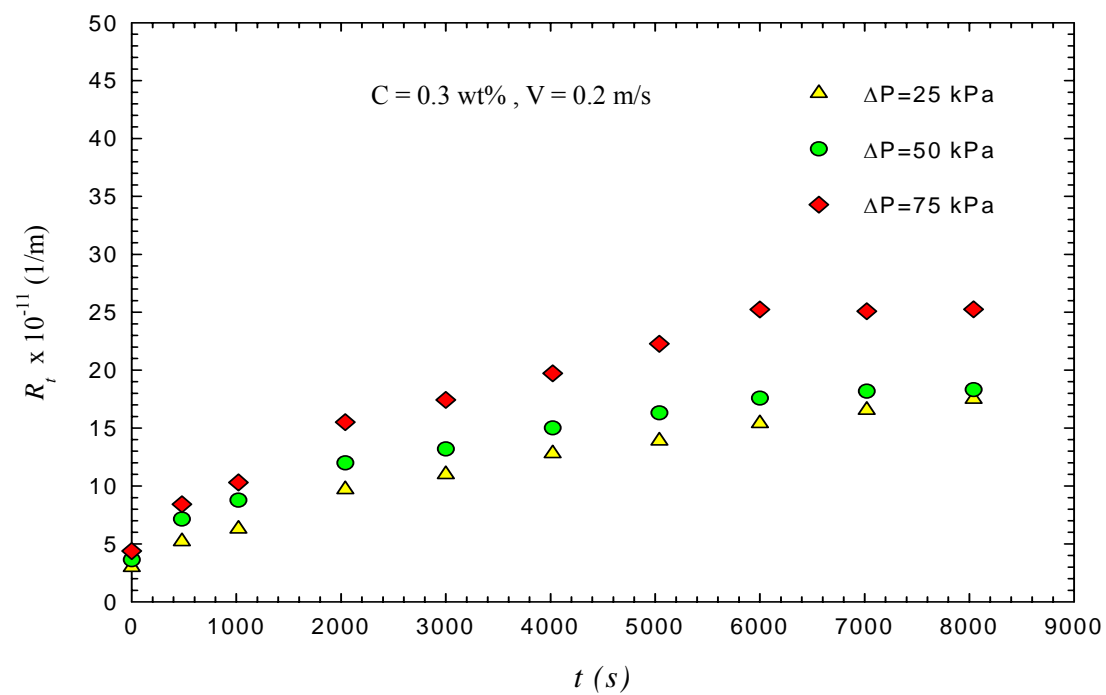


圖 5-38 不同過濾壓差下過濾總阻力隨時間之變化情形

5-8-3 掃流速度對滬速之影響

在掃流速度對滬速的影響方面，本研究採用固定過濾壓差及固定懸浮液濃度下，探討不同的掃流速度對於滬速衰減之變化情形，如圖 5-39。從圖中可得知，當在低掃流速度下操作時，所得到的滬速值較低；當在高掃流速度下操作時，所得到的滬速值較高。操作在高掃流速度下，之所以可得到較高滬速值，乃是因為高掃流速度所提供膜面之水力剪應力較大，以致於粒子被帶走的機率增加，粒子較不易附著於薄膜表面，使得阻塞的情況減少，進而滬速衰退的程度較少；相反的，操作在低掃流速度下，由於提供膜面之水力剪應力較小，以致於粒子被帶走的機率降低，粒子附著於薄膜表面的機會增加，使得阻塞的情況增加，進而滬速衰退的程度較大。此外，由圖中可觀察到，在固定過濾壓差為 50 kPa、懸浮液濃度為 0.2 m/s 下，滬速隨著時間的增加而遞減，尤其是從過濾初期到過濾 600s 之間，由於粒子開始沈積於膜面上阻塞膜孔，導致滬速衰減的趨勢極大，但因為膜面上的滬餅尚待形成，因此可以得到較高的滬速。600s 到 2000s 之間，膜面上的滬餅結構逐漸緊密，滬速衰減的趨勢較為減緩；2000s 之後，膜面上的滬餅完整形成，滬速則逐漸趨於穩定。

圖 5-38 為不同掃流度下過濾總阻力隨時間之變化情形，比較圖中 $V=0.1$ m/s、 $V=0.2$ m/s，與 $V=0.4$ m/s 三種掃流速度下之操作，可發現在高掃流速度下操作時，過濾總阻力較低；而在低掃流速度下操作時，過

濾總阻力較高，且過濾總阻力之提升程度上低掃流速度下操作時較高掃流速度下操作時快。

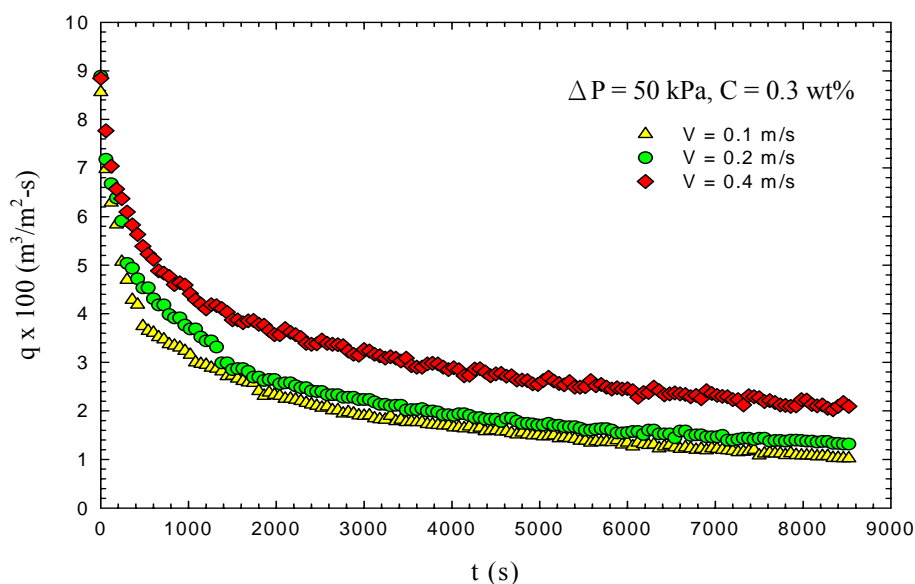


圖 5-39 定過濾壓差與定懸浮液濃度下掃流速度對濾速之影響

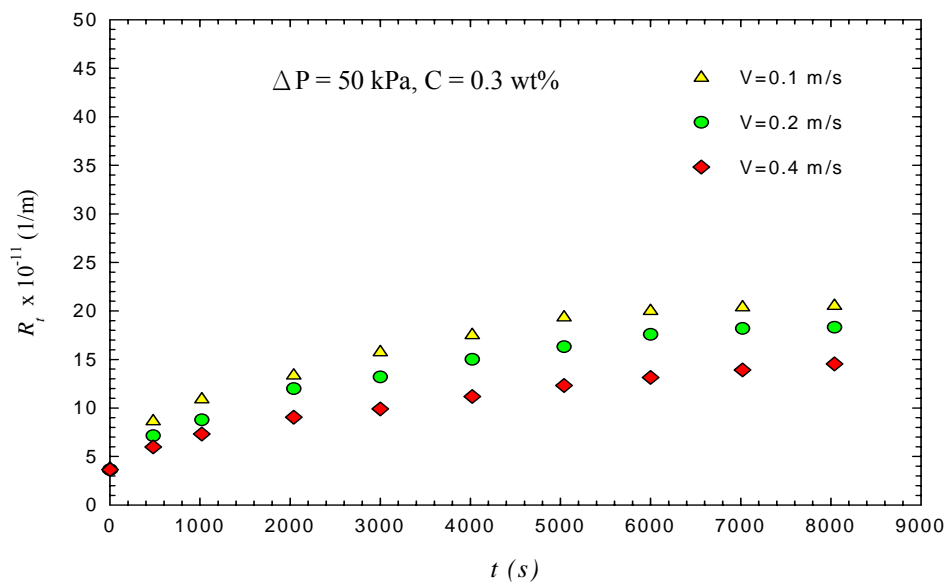


圖 5-40 不同掃流速度下過濾總阻力隨時間之變化情形

5-9 膜面上之受力對濾速之影響

由 5.1.3 結果可知，在管式膜過濾程序中，膜面上之掃流速度大小對濾速之影響甚鉅，而主要的原因在於掃流速度的大小決定膜面上之剪應力大小。以掃流過濾做為過濾的方式，其目的是希望能夠藉由進料沖刷薄膜表面，於薄膜表面產生剪應力，使流體中的粒子不易堆積於膜面上，達到較好的過濾效果。因此，本研究乃針對管式膜過濾系統中，濾室內部之流態加以模擬，進而分析膜面上之受力分佈情形。

5-9-1 管式膜過濾膜面受力分析

由於掃流速度的大小為影響濾速之因素之一，因此，藉由模擬濾室內之掃流速度分布，有助於了解粒子可能沈積之區域。圖 5-41 為濾室內之掃流速度分布圖，此圖為殼管與膜面間流場的局部放大圖，流體由左方進流端起，流動至左方 1/4 管長處終。圖中左邊有一不同顏色的色條，每一種顏色分別有相對應的數值，此處數值代表各個位置速度值的大小。由圖中可以看到，膜面上流體流動的方向為由左向右流動(z-direction)，其速度值隨移動的距離增加而逐漸變小，同時越靠近膜面(y-direction)之速度值亦越小，說明了粒子可能會沈積在接近膜面且低流速之區域。

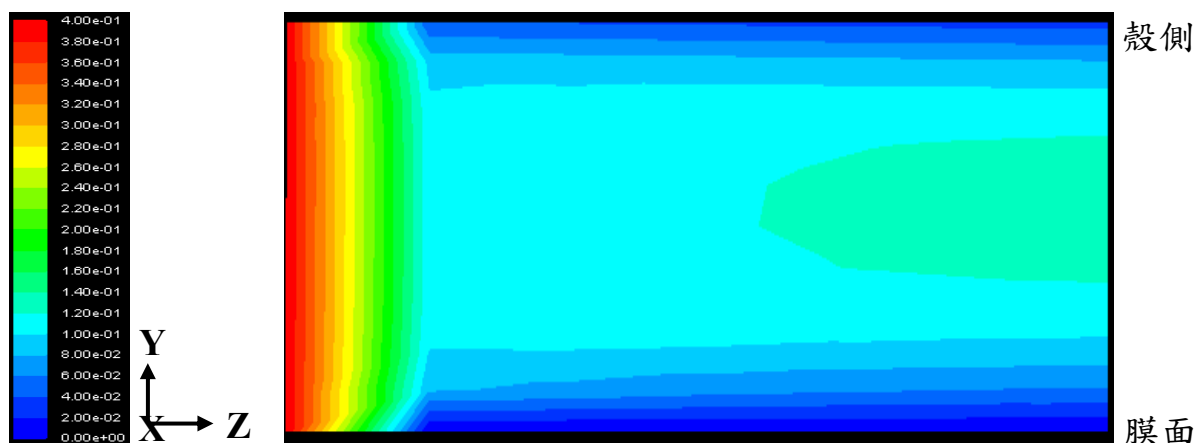


圖 5-41 濾室內之掃流速度分佈圖

在討論完濾室內之掃流速度分佈後，接下來，針對圖 5-39 中三種操作在不同掃流速度下之膜面上的受力分佈情形加以分析，並且比較彼此之差異。圖 5-42 為不同掃流速度下膜面剪應力值之比較，為了方便探討模組內部不同位置的受力，計算上將膜面依流體流動方向分成十等分分別計算受力值，流體流經膜面的全長為 0.6 m，由於進出口端效應之影響，因此在 0.03 m 之前以及 0.57 m 之後的區域其數據值不予採用。由圖中可以看到，膜面上的剪應力分布為：接近進口端之剪應力會隨著掃流距離增加而減小，掃流距離約 0.1 m 後剪應力即幾乎維持一定值。當速度操作在 0.2 m/s 時，剪應力之衰退量約為二分之一，由 0.00122 N(0.03 m)減少至 0.000564 N(0.09 m)；當速度操作在 0.4 m/s 時，各點剪應力的值幾乎都大於 0.2 m/s 下之值(唯 $V = 0.4$ m/s，在 0.57 m 位置時，其受力值為 0.00114 N，然而，當 $V = 0.2$ m/s，在 0.03 m 位置時，其受力值只有 0.00122 N)；當速度操作在 0.2 m/s 時，各

點剪應力的值也幾乎都大於 0.1 m/s 下之值。由此得知，高掃流速度較低掃流速度剪應力大，相對之可能會沈積於膜面上的粒子便較少，以至於可以得到較高的濾速值。

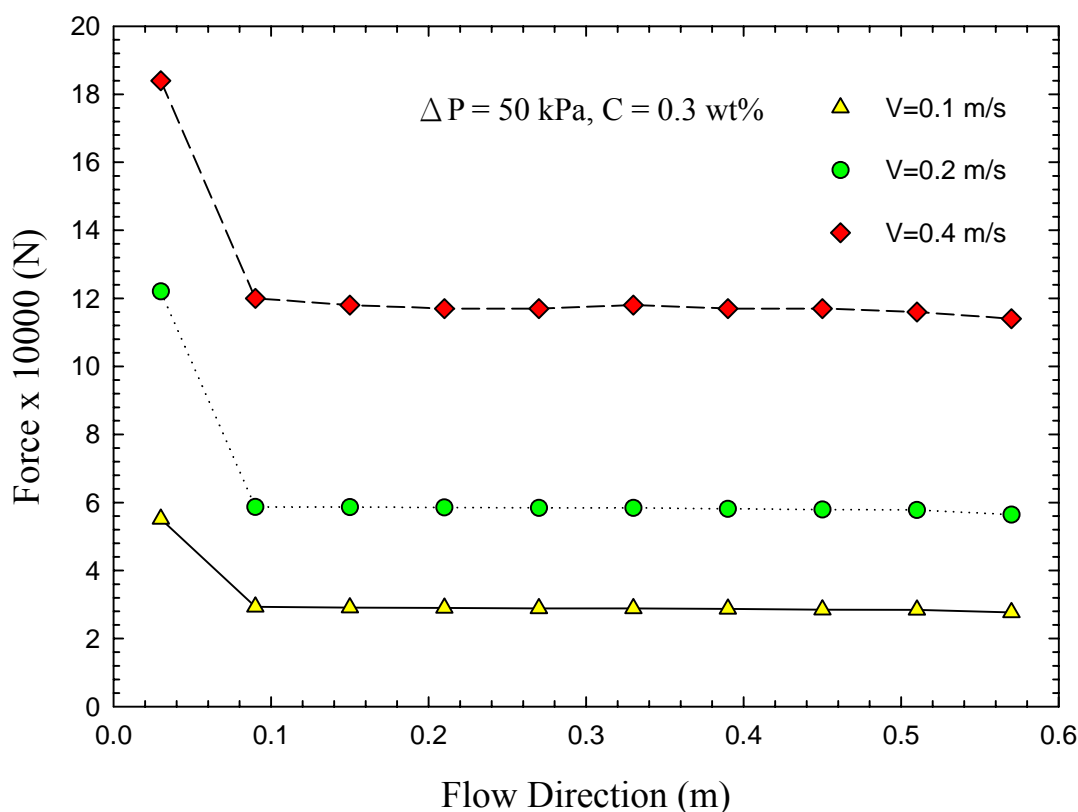


圖 5-42 不同掃流速度下膜面剪應力值之比較

5-9-2 外加側流之管式膜過濾膜面受力分析

由 5-9-1 結果可知，在高掃流速度下操作，其水力所施予膜面之剪應力大，有助於減緩濾餅之生成，進而達到提升濾速之功效。但是提高掃流速度並非是提升濾速之最佳方式，主要是因為在高掃流速度下操作所需的能

量消耗也相對的提高，並不符合經濟上的考量。此外，提高掃流速度雖然有利於帶走較大之粒子，但懸浮液中較細微的粒子卻會附著於膜面上或形成一濃度層，因而造成過濾阻力增加，濾速降低(Wakeman&Tarleton,1993)。因此，本研究利用外加側流(side stream, SD)之方式於濾室中增加剪應力，此設計主要是利用一針閥將同一幫浦打入的流體一分為二，控制進流端與側流端的比例，企圖於消耗相同能量的情況下得到更多的濾速值。基於以上的構思，所以在模擬計算上將外加側流之位置設計在剪應力衰減後之區域，來提升剪應力的大小。圖 5-43 為有無外加側流膜面上之速度分佈圖比較，此圖為殼管與膜面間流場的局部放大圖，範圍在 0.1 m 到 0.4 m 間(z-direction)，圖中右上方為側流進口(0.15 m 處)。由圖中可以看到，圖 5-43 (a) 為外加側流管式膜過濾之掃流方式，掃流速度為 0.2 m/s(單位時間內之進料流率(feed, F)為 17g/s)，而在側端有一進口物流(8.5g/s)；圖 5-43 (b) 為外加側流管式膜過濾之掃流方式，掃流速度為 0.2 m/s，而在側端有一進口物流(17 g/s)；圖 5-43 (c) 為一般管式膜過濾之掃流方式，其掃流速度為 0.4 m/s(34 g/s)，在上敘述中，圖 5-43 (b)與圖 5-43 (c)兩者輸送至濾室內的質量流率相等。由圖 5-43 (b)與圖 5-43 (c) 之間的比較可以看出，有無側流之間速度分佈之差異以及所造成之膜面上流態的變化；由圖 5-43 (a)與圖 5-43 (b) 之間的比較可以看出，當增加側端物流的質量流率相對的會提高側端物流之進口速度，進而影響膜面上之流態。

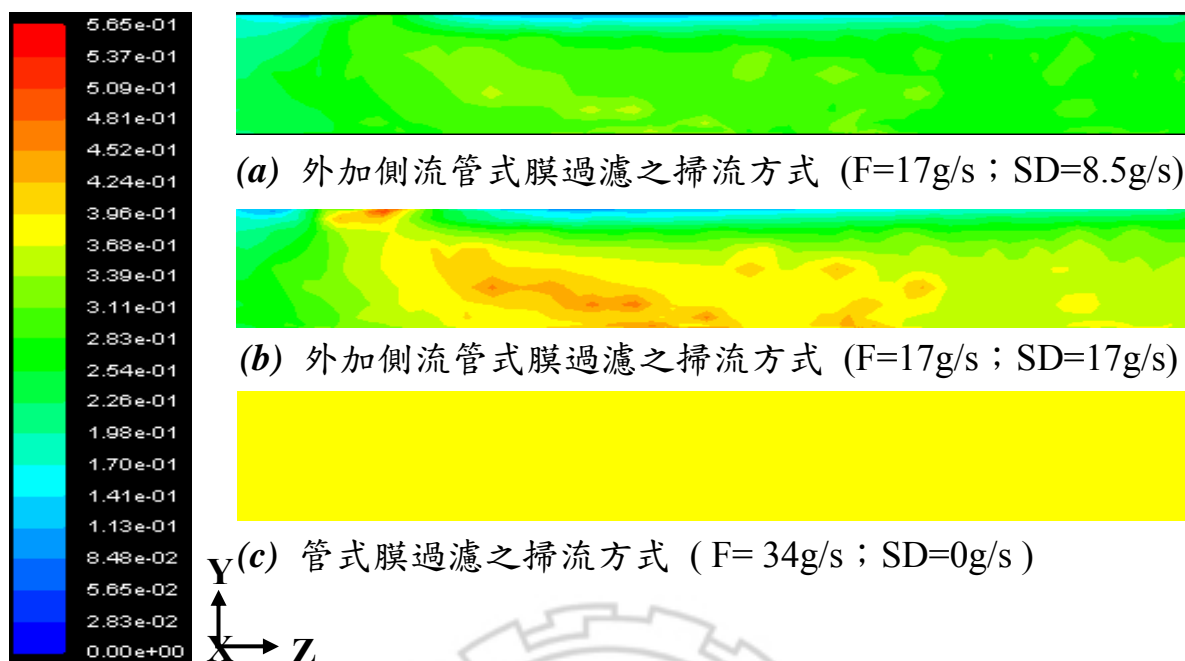


圖 5-43 有無外加側流膜面上之速度分佈圖

在討論完有無外加側流膜面上之速度變化探討結束後，接下來，針對有側流之膜面受力分佈加以分析，圖 5-44 為有無外加側流膜面剪應力值之比較($\Delta P=50\text{ kPa}$, $C=0.3\text{ wt\%}$)。相同的，流體流經膜面的全長為 0.6 m ，由於進出口端效應之影響，因此在 0.03 m 之前以及 0.57 m 之後的區域其數據值不予採用。由圖 5.10 中可以看到，在同種操作條件下，在一般管式膜過濾方式($0.4\text{ m/s}(F=34\text{ g/s})$ & $0.2\text{ m/s}(F=17\text{ g/s})$)下，膜面上的剪應力大小會隨著掃流距離而減小，而約在 0.15 m 之後，其剪應力大小變化不大，因此，粒子可能會沈積在此區域當中。所以，在此將濾室的側端外加一道物流來提升此區域的剪應力值。若將一般管式膜過濾 $0.4\text{ m/s}(F=34\text{ g/s})$ 與外加側流管

式膜過濾 0.2 m/s ($F=17\text{ g/s}$; $SD=17\text{ g/s}$)兩者之間作比較，可以看出當操作在管式膜過濾時整體的剪應力值小於外加側流管式膜過濾，僅有在 0.03 m 到 0.12 m 之間的剪應力值較外加側流管式膜過濾大，所以外加側端物流的質量流率的确會提升整體的剪應力大小，因此推測在此兩種過濾程序中，一般管式膜過濾的粒子沈積情況應該會較外加側流管式膜過濾嚴重，所以過濾效果會以外加側流管式膜過濾較好。

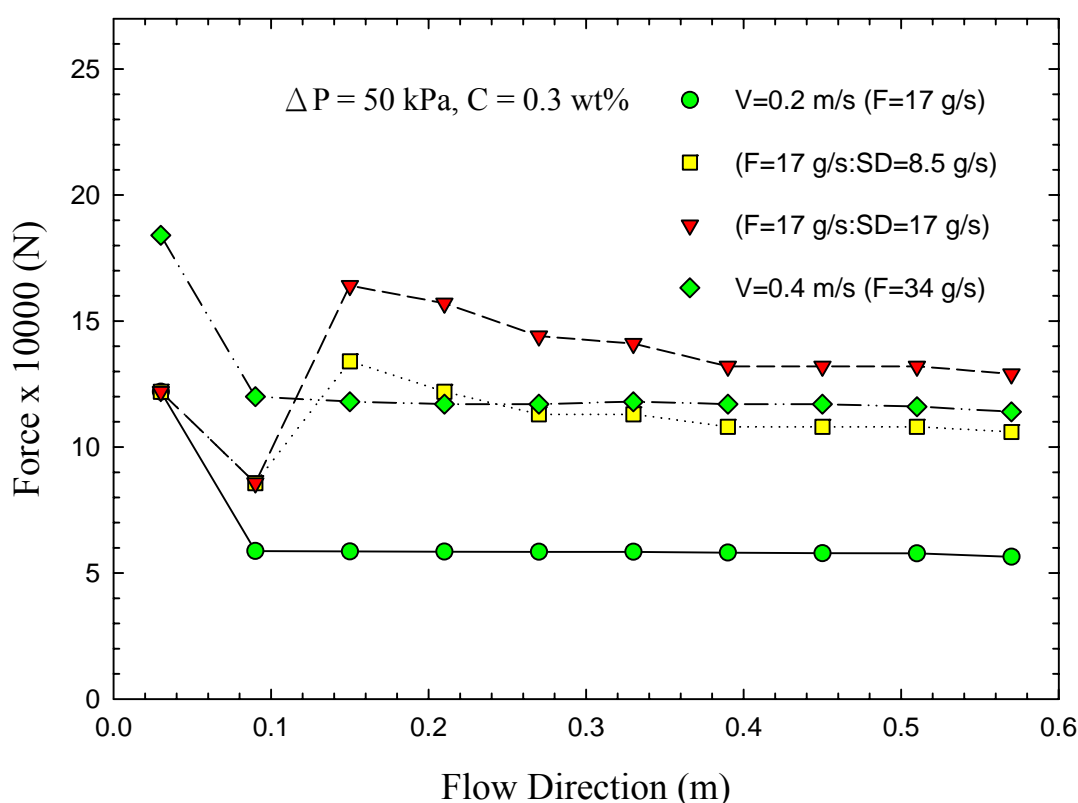


圖 5-44 有無外加側流膜面剪應力值之比較

此外，由不同側流比例[($F=17\text{ g/s}$; $SD=8.5\text{ g/s}$)、($F=17\text{ g/s}$; $SD=17\text{ g/s}$)、 $V=0.4\text{ m/s}$ ($F=34\text{ g/s}$)]下之剪應力比較看來，當側端引進另一道物流時，在

原先粒子容易沈積之區域(0.15 m 之後)上，其膜面上的剪應力值都有所增加，並且剪應力大小隨側端物流的質量流率增加而增加。

特別需要注意圖 5-44 中，操作在($F=17$ g/s； $SD=8.5$ g/s)與 $V=0.4$ m/s ($F=34$ g/s)受力曲線非常接近。整體來說，操作在($F=34$ g/s)時的剪應力值較 ($F=17$ g/s； $SD=8.5$ g/s)大，但在 0.12 m 與 0.23 m 之間的剪應力卻以($F=17$ g/s； $SD=8.5$ g/s)較大。因此，推測在此兩種操作條件下過濾，其粒子的沈積量應該相近，過濾效果應該相當。不過，由於位於 0.23 m 後之兩種操作條件下之剪應力幾乎維持一定值，所以，推測如果在長時間下過濾，操作在($F=34$ g/s)時的過濾效果比較操作在($F=17$ g/s； $SD=8.5$ g/s)時好。



5-10 外加側流之管式膜過濾實驗數據分析

從 5-9-2 節模擬計算之結果顯示，在濾室的側端加入另一道物流可以改變膜面上之受力分佈，並影響其粒子沈積的情形。因此，將模擬所得到的外加側流之管式膜過濾膜面受力，與外加側流之管式膜過濾實驗所得到的濾速衰減變化加以分析討論。在外加側流之管式膜過濾實驗中，主要探討定過濾壓差、定懸浮液濃度下，外加側流對濾速之影響，以及分析過濾效果是否有所提升。圖 5-45 為定過濾壓差與定懸浮液濃度下有無外加側流對濾速之影響。由圖中可以看到，從下而上之三條過濾曲線分別為：無外加側流下，進料端之質量流率為 8.5g/s、無外加側流下，進料端之質量流率為 17g/s、有外加側流下，進料端之質量流率為 8.5g/s，側流端之質量流率為 8.5g/s。由此可知，外加側端物流的質量流率有助於提升過濾效果，並且在相同進料之質量流率下，外加側流管式膜過濾會較一般管式膜過濾佳。印證 5.2.2 節模擬計算之結果可發現，外加側流管式膜過濾效果較佳的主要因為外加側端物流的質量流率增加相對的會提高膜面的剪應力大小，使粒子不易沈積在膜面上，進而提升濾速值。

圖 5-46 為有無外加側流之過濾總阻力隨時間變化之變化情形，比較圖中 $V=0.1 \text{ m/s}$ ($F=8.5 \text{ g/s}$)、($F=8.5 \text{ g/s}$ ； $SD=8.5 \text{ g/s}$)，與 $V=0.2 \text{ m/s}$ ($F=17 \text{ g/s}$) 三種掃流速度下之操作，可發現過濾總阻力隨著掃流速度的增加而降低，且在無外加側流操作下之過濾總阻力較有外加側流操作下大。

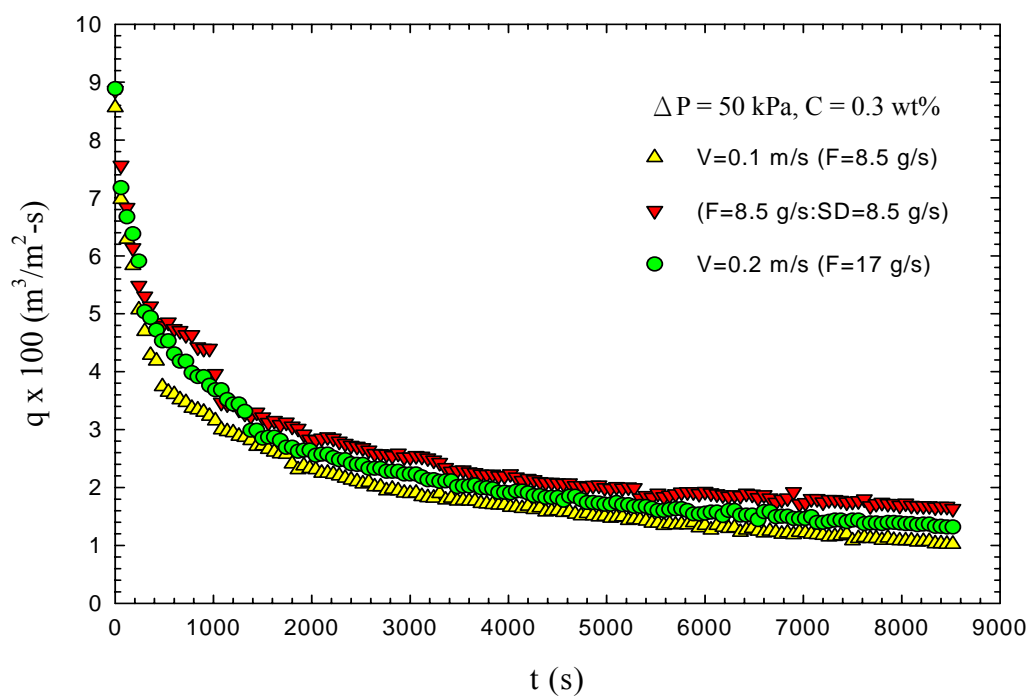


圖 5-45 定過濾壓差與定懸浮液濃度下有無外加側流對濾速之影響

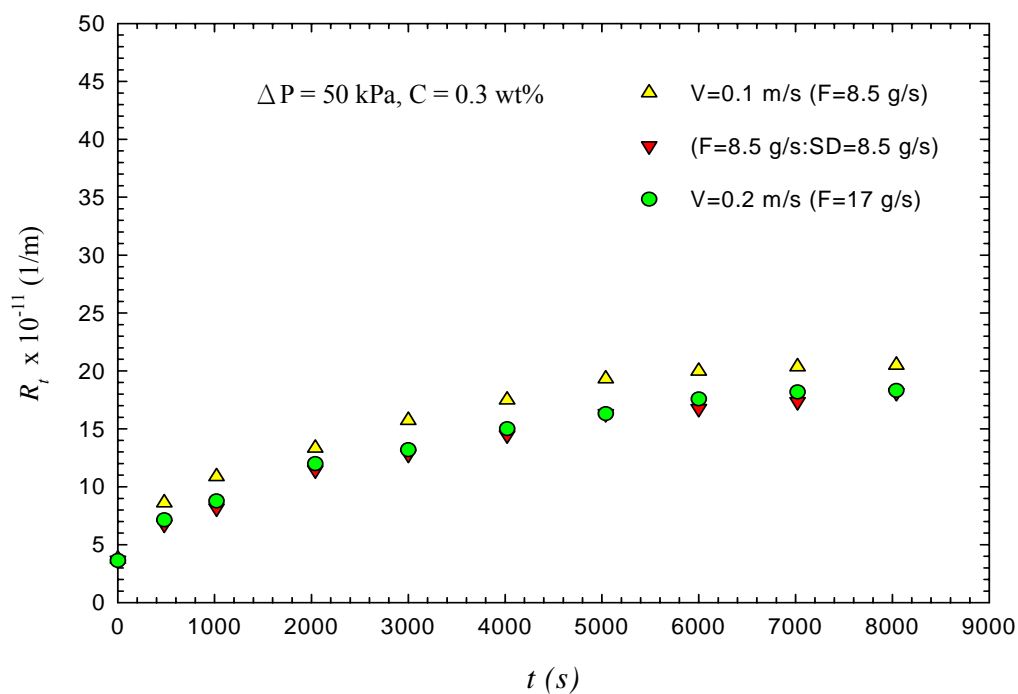


圖 5-46 有無外加側流之過濾總阻力隨時間之變化情形

圖 5-47 為定過濾壓差與定懸浮液濃度下不同側流比例對濾速之影響，從圖中之 $V=0.2 \text{ m/s}$ ($F=17 \text{ g/s}$)、($F=17 \text{ g/s}$ ； $SD=8.5 \text{ g/s}$)、($F=17 \text{ g/s}$ ； $SD=17 \text{ g/s}$)三種操作下可以看出，濾速值會隨側端物流的質量流率增加而增加。另外，在($F=17 \text{ g/s}$ ； $SD=8.5 \text{ g/s}$)與 $V=0.4 \text{ m/s}$ ($F=34 \text{ g/s}$)之穩定濾速比較上，可以看出當過濾程序在 3000s 內，以操作在($F=17 \text{ g/s}$ ； $SD=8.5 \text{ g/s}$)下所得的穩定濾速值較大；當過濾程序超過 3000s，則以操作在($V=0.4 \text{ m/s}$ ($F=34 \text{ g/s}$))下所得的穩定濾速值較大。由此可知，若當過濾程序在 3000s 內，可利用外加側流之方式減少能源之使用。此外，亦可印證 5-9-2 節之推測：在長時間下過濾，操作在($F=34 \text{ g/s}$)時的過濾效果較操作在($F=17 \text{ g/s}$ ； $SD=8.5 \text{ g/s}$)時好。

圖 5-48 為不同側流比例下過濾總阻力隨時間之變化情形，比較圖中 $V=0.2 \text{ m/s}$ ($F=17 \text{ g/s}$)、($F=17 \text{ g/s}$ ； $SD=8.5 \text{ g/s}$)，與 $V=0.4 \text{ m/s}$ ($F=34 \text{ g/s}$)三種掃流速度下之操作，可發現過濾總阻力隨著掃流速度的增加而降低；比較圖中 $V=0.2 \text{ m/s}$ ($F=17 \text{ g/s}$)，與 $V=0.4 \text{ m/s}$ ($F=34 \text{ g/s}$) 可發現在無外加側流之操作下過濾總阻力較有外加側流之操作下大。

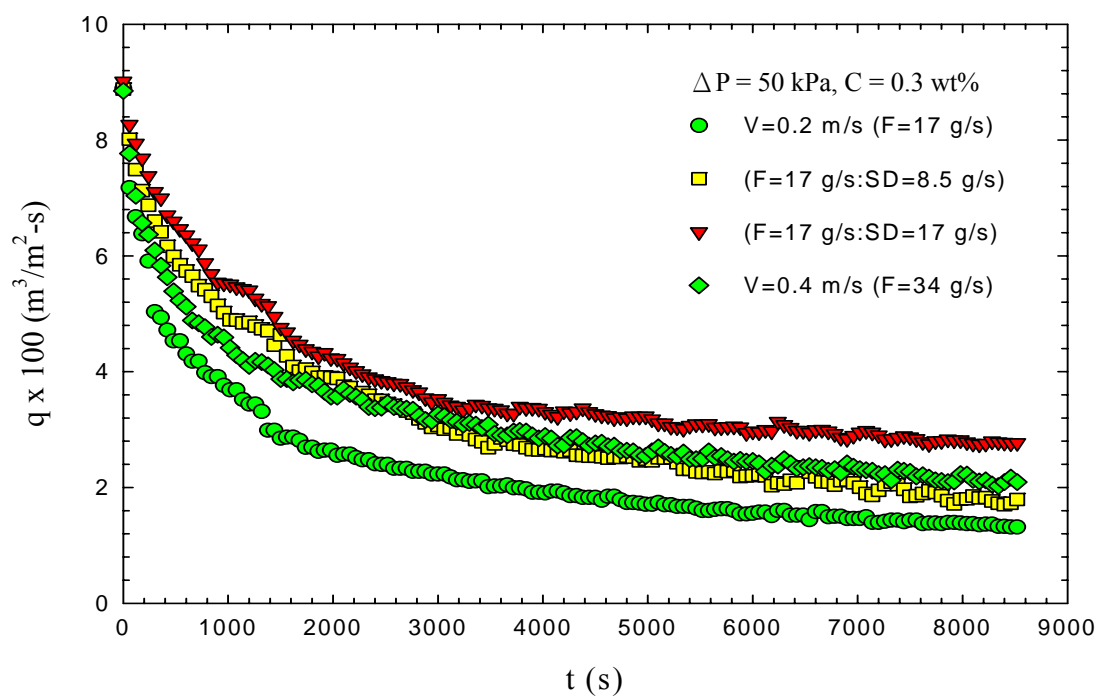


圖 5-47 定過濾壓差與定懸浮液濃度下不同側流比例對濾速之影響

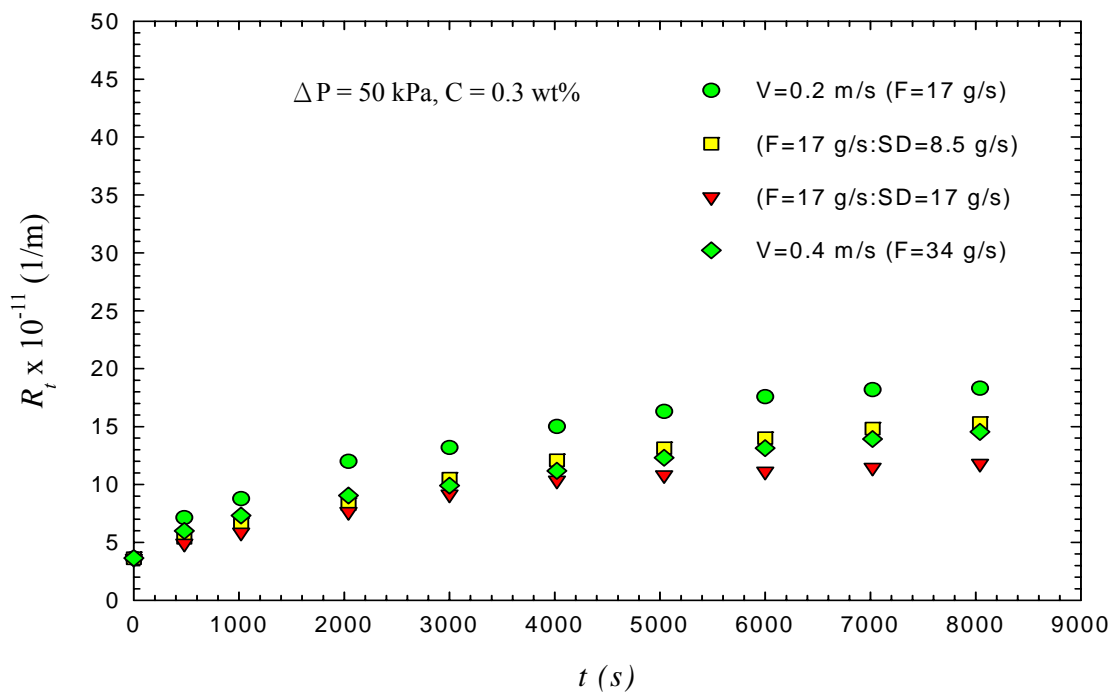


圖 5-48 不同側流比例下過濾總阻力隨時間之變化情形

5-11 反洗操作對濾速之影響

由上節之結果可知，改變流場的設計有助於減緩薄膜表面濾餅之生成。不過，在過濾程序中，由於粒子持續受到操作壓力之擠壓導致濾餅沈積更加緻密，並且可能受到碰撞與壓迫的情況使其發生斷裂或者破碎，造成膜孔阻塞。為了解決此阻塞問題，本研究在過濾程序中加入間歇性的反洗操作，即過濾一段時間後停止過濾，接著進行短暫的反洗操作，然後再進行過濾，重覆的循環操作，並且針對反洗的操作方式利用模擬加以改良。

5-11-1 多相流模式之反洗模擬分析

在模擬方面，本研究以 CFD 軟體發展出 Eulerian 模式，定義兩相(水相與固體相)的流動，來模擬真實掃流過濾之情形。設定方面採用待穩定之濾速值當作反洗之時機，先使用 steady state 方式模擬過濾程序到達穩定下之流場，再針對此流場進行 30s 的 unsteady state 反洗操作。圖 5-49 為反洗模組(Case-1)之結構圖，此反洗方式為：濾液從濾液端進入，經由壓力差透過薄膜，將沈積在膜面之粒子洗出，接著把洗出的粒子從濃排端帶出。

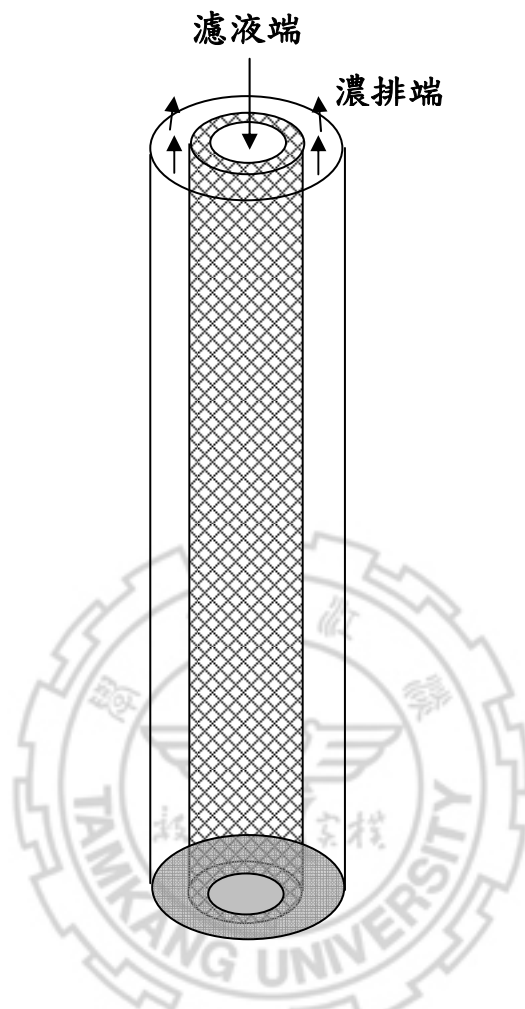


圖 5-49 反洗模組(Case-1)之結構圖

圖 5-50 為反洗程序 0-30s 之膜面上粒子體積分率變化情形(Case-1)，圖中左邊有依不同顏色的色條，每一種顏色分別有相對應的數值，此處數值代表各個位置體積分率的大小。由圖可知，薄膜表面上粒子的體積分率會隨著反洗時間的增加而降低，因此反洗操作將有助於提升過濾效果。

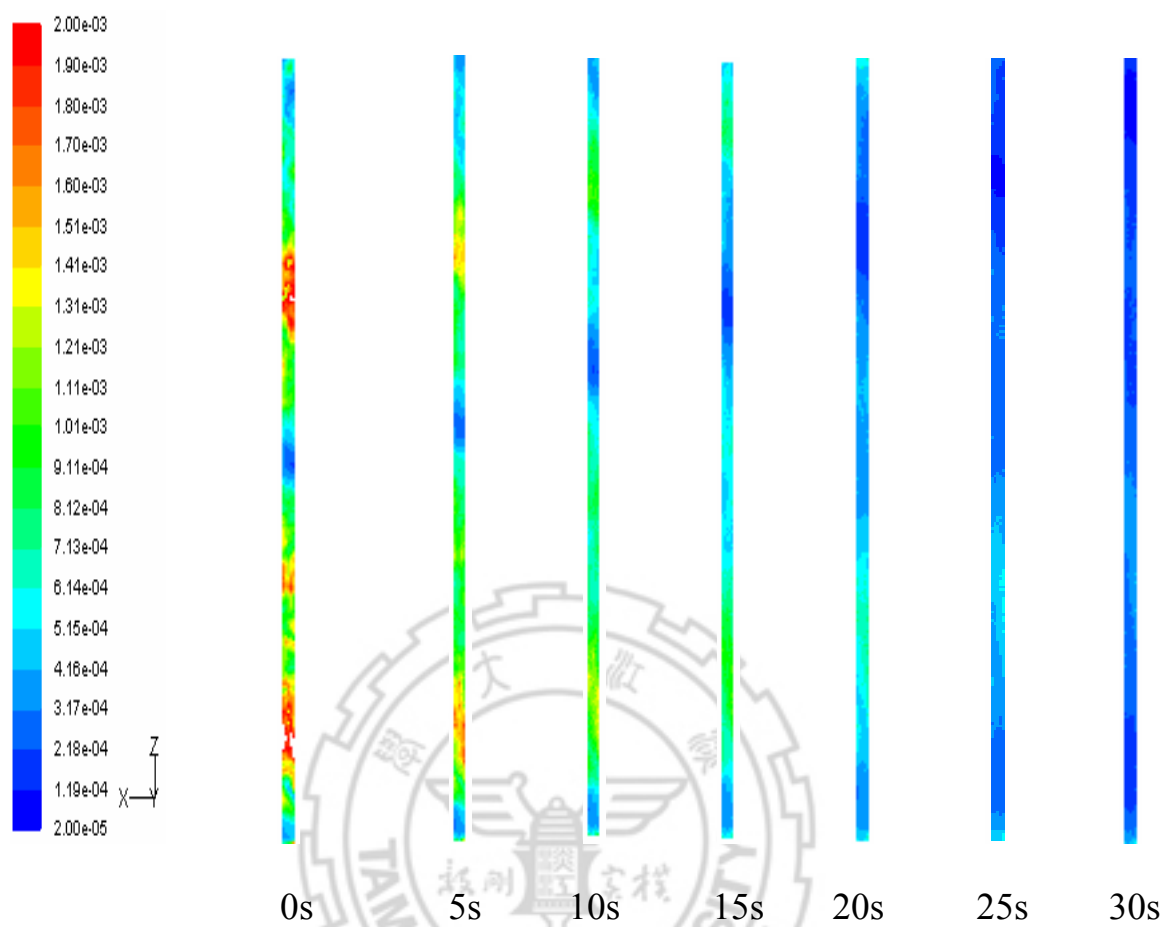


圖 5-50 反洗程序 1-30s 之膜面上粒子體積分率變化情形(Case-1)

從整個 Case-1 之反洗過程可以發現，膜管下半部分所佔的粒子體積分率明顯大於膜管中其他部分的粒子體積分率，因此估計膜管之下半部分因為粒子較不容易被清洗出來，導致會有較多的粒子沈積，而影響過濾效果。為了解決膜管下半部分粒子沈積的問題，在研究方面針對反洗的操作方式進行改良，採用外加側流管式膜過濾模組，估計模組底部的側流端，會方便反洗操作所清洗出的粒子排出，故嘗試以此反洗方式 (Case-2) 進行模擬。圖 5-51 為反洗模組(Case-2)之結構圖，此反洗方式為：在殼管上距進料端 0.15 m 處開一側面出口，當濾液從濾液端進入，經由壓力差透過薄膜，將沈積在膜面之粒子洗出，接著把洗出的粒子從濃排端與側流端帶出。



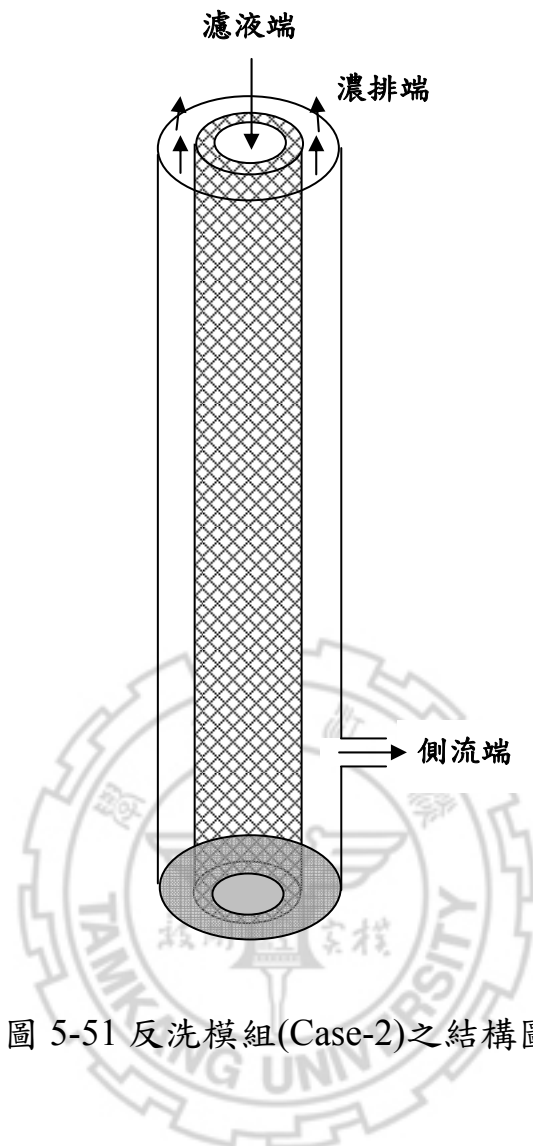


圖 5-51 反洗模組(Case-2)之結構圖

圖 5-52 為反洗程序 0-30s 之膜面上粒子體積分率變化情形(Case-2)，由圖可知，同反洗方式(Case-1)之結果，薄膜表面上粒子的體積分率會隨著反洗時間的增加而降低，此反洗方式操作亦有助於提升過濾效果。

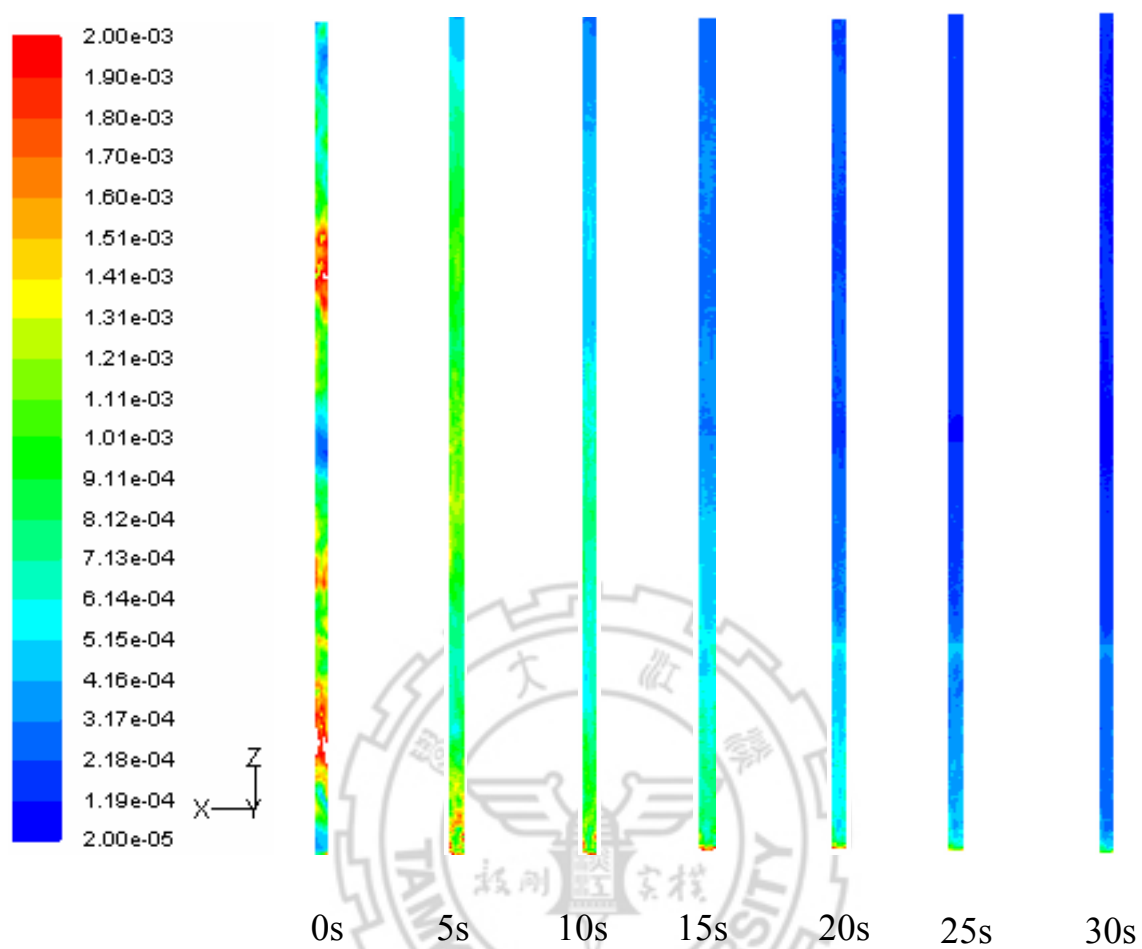


圖 5-52 反洗程序 1-30s 之膜面上粒子體積分率變化情形(Case-2)

將 Case-1 與 Case-2 反洗 30s 後之膜面上粒子體積分率分布情形做比較，如圖 5-53。圖 5-53 為下半部膜管反洗 30s 之比較，圖中可明顯發現，雖然大部分粒子之體積分率還是集中在膜管下半部，但整體來說利用 Case-2 的方式進行反洗，薄膜表面上粒子的體積分率會較 Case-1 的方式少，其原因為 Case-2 之結構中，在殼管上距進料端 0.15 m 處開一側面出口，使得反洗出的粒子不僅可以由濃排端排出，亦可提前於側流端流出。

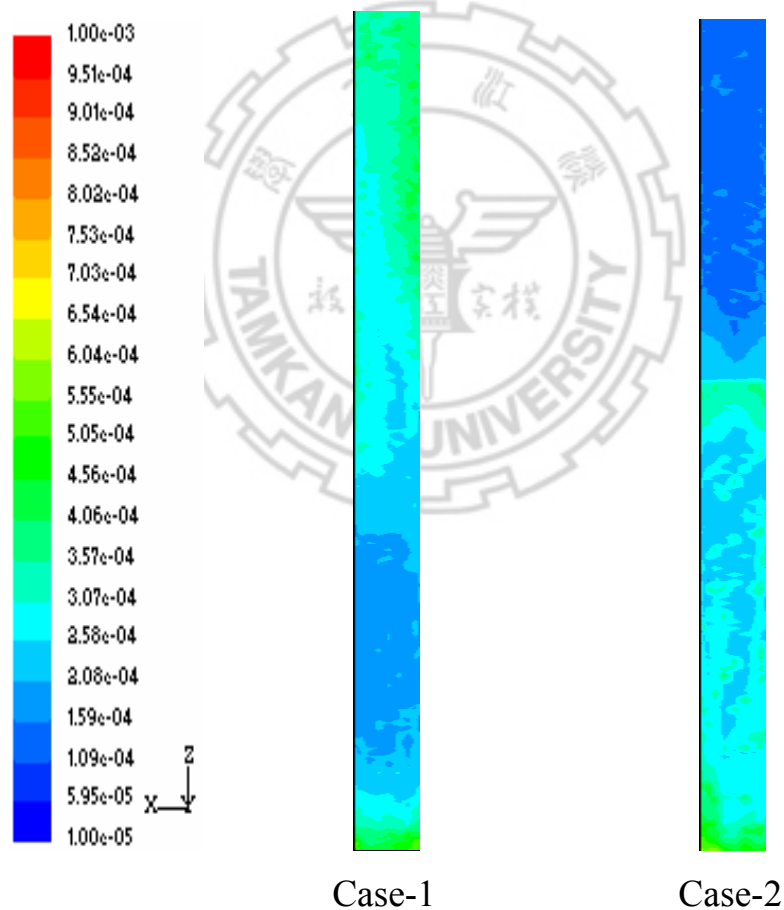


圖 5-53 下半部膜管反洗 30 s 之比較

5-11-2 間歇性反洗操作之管式膜過濾實驗數據分析

從 5-11-1 節反洗模擬之結果顯示，在過濾程序中加入反洗操作有助於降低薄膜表面上粒子的體積分率，因此，將模擬所得到的反洗結果，與間歇性反洗操作之管式膜過濾實驗所得之濾速衰減變化加以分析討論。在間歇性反洗操作之管式膜過濾實驗中，主要探討間歇性反洗操作對濾速之影響，以及分析過濾效果是否有所提升。圖 5-54 為不同結構之間歇性反洗操作對濾速之影響，由圖中可以看到，當一般管式膜過濾時，得到的濾速值較低；在間歇性反洗操作之管式膜過濾時，得到的濾速值較高。操作在間歇性反洗操作下，之所以可得到較高濾速值，乃是因為間歇性反洗操作可以破壞長期過濾下沈積於薄膜表面的濾餅層，減少附著於薄膜表面的粒子，使得阻塞的情況減少，進而濾速會相對提升，此外，比較 Case-1 與 Case-2 之過濾曲線可發現，Case-2 之反洗操作較 Case-1 之反洗操作過濾效果佳，符合 5-11-1 節反洗模擬結果。

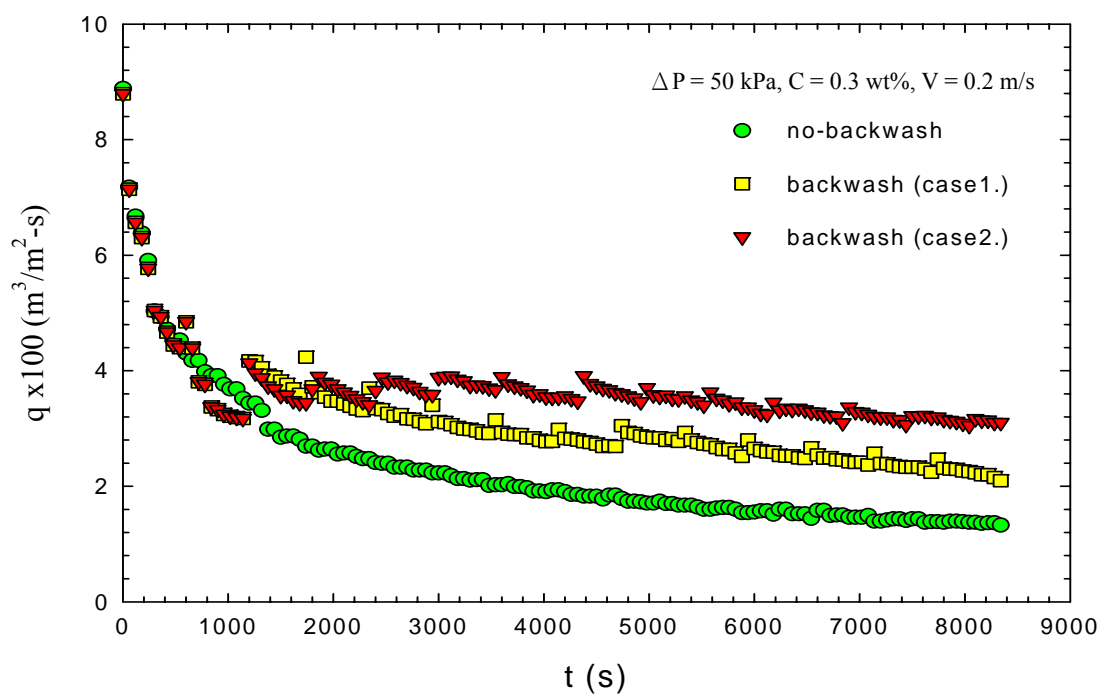


圖 5-54 不同結構之間歇性反洗操作對濾速之影響

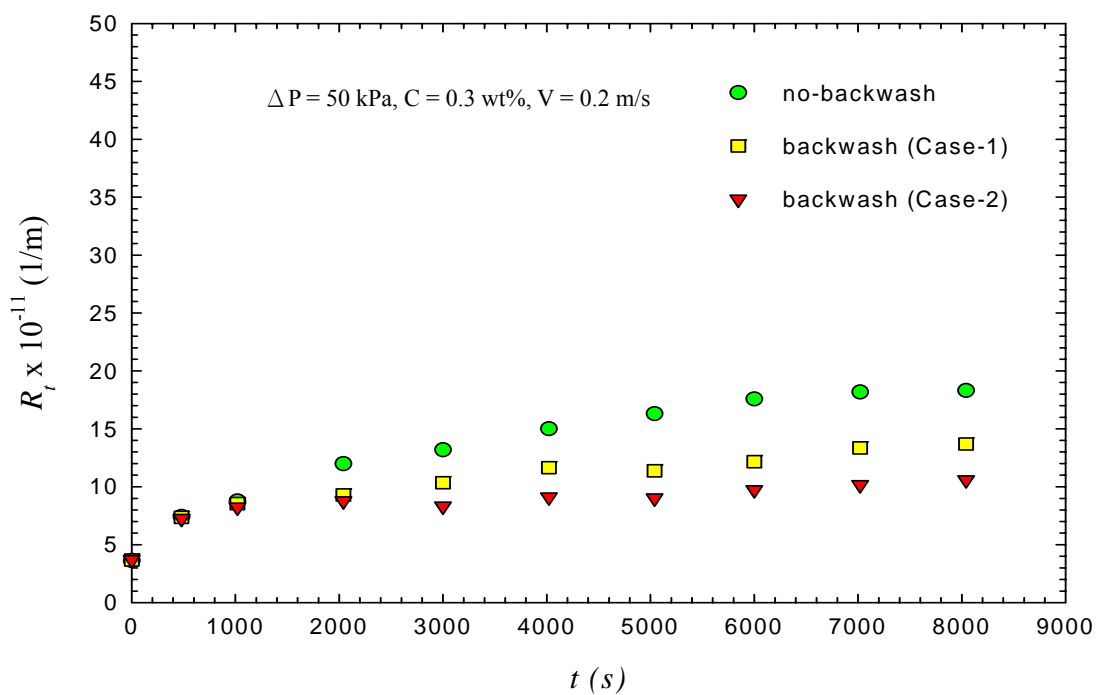


圖 5-55 不同結構之間歇性反洗操作下過濾總阻力隨時間之變化情形

5-12 改變過濾策略之效率評估

本研究的方向主要是討論在不同操作條件下，膜面上之結垢產生所導致濾速值衰退情形，藉由瞭解薄膜結垢產生的過濾阻力快速增加的原因和時機，並且適時有效的減緩薄膜上的結垢，就可以達到濾速值提升的目標。在本研究中，針對改變濾室內的流力狀態方面提出外加側流，以及反洗操作的方式來提升濾速值。圖 5-56 為改變過濾策略之比較，由圖中可以看到，濾速值提升高低依次為：間歇性反洗操作之管式膜過濾(Case-2)，其次為間歇性反洗操作之管式膜過濾(Case-1)，接下來為外加側流之管式膜過濾，最後是一般的管式膜過濾。由此可知，本研究所提出之兩種過濾方式皆可達到濾速值提升的目標。然而，濾速值提升越多並不代表效率越好。表 5.1 為改變過濾策略之效率評估，假設管式膜過濾總過濾量為 Q_1 ，效率為 100%，則外加側流之管式膜過濾總過濾量為 Q_2 ，效率為 $\frac{Q_2}{Q_1}$ ；間歇性反洗操作之管式膜過濾(Case-1)總過濾量 Q_3 ，效率為

$\frac{Q_3 - Q_b}{t + t_b} \bigg/ \frac{Q_1}{t}$ ；間歇性反洗操作之管式膜過濾(Case-2)總過濾量 Q_4 ，效率為 $\frac{Q_4 - Q_b}{t + t_b} \bigg/ \frac{Q_1}{t}$ 。其中， Q_b 為反洗用水、 t 為過濾時間、 t_b 為反洗時間。

由此可知，假設不考慮幫浦運作所需消耗之能源，則以間歇性反洗操作之管式膜過濾(Case-2)為最佳過濾方式。

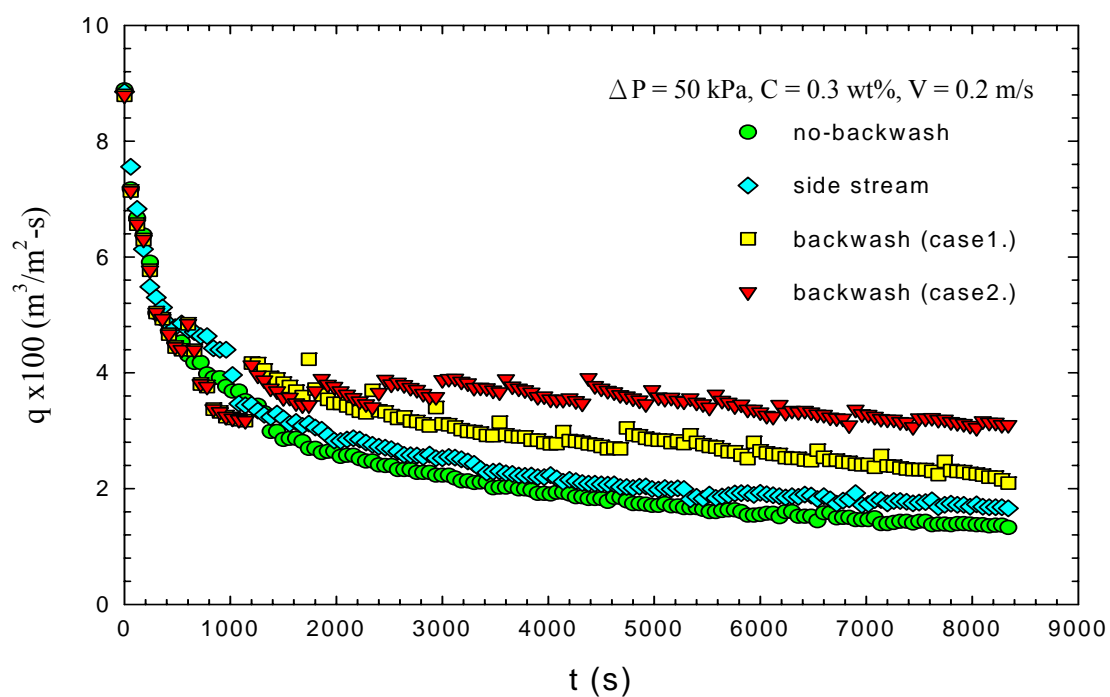


圖 5-56 改變過濾策略之比較

表 5.1 改變過濾策略之效率評估

過濾方式	效率評估(%)
管式膜過濾	100
外加側流之管式膜過濾	120
間歇性反洗操作之管式膜過濾(Case-1)	111
間歇性反洗操作之管式膜過濾(Case-2)	132

六、結論

在平板研究中主要探討掃流微過濾之薄膜表面上的受力情形，以及針對阻力的變化加以模擬分析。在掃流構造改良上，本研究乃利用側流的方式來改變濾室中的流力狀態，使膜面上之剪應力有所變化，因此降低過濾所造成之阻力，進而達到提升濾速的效果。然而，實驗與模擬之內容可以歸納出以下幾點結論：

1.在掃流微過濾的實驗上，可以得到以下之結論：

(1).操作在高掃流速度、低懸浮液濃度下，濾速衰退的情形較為平緩，

反之，在低掃流速度、高懸浮液濃度下，濾速衰退的情形較為迅速。

(2).操作在高掃流速度、高過濾壓差及低懸浮液濃度下，可得到較高的穩定濾速。

(3).操作在高掃流速度、低過濾壓差及低懸浮液濃度下，其粒子堆積的量較少，所以過濾阻力相對的較低。

2.將掃流微過濾作模擬之分析，針對各種操作條件下的濾速衰減變化作擬穩態之模擬，則可以得到在各時間點下的擬穩態阻力值，進而得到濾速與過濾總阻力之關係。

3.在膜面受力情形之探討上，主要分為基本掃流過濾與有側流之掃流過濾兩部份：

- (1).從基本掃流過濾的膜面受力分析上，可以看出膜面上的剪應力值，隨著掃流速度的增加而增加。過濾壓差及懸浮液濃度的改變對膜面上的受力分佈影響較小。
- (2).從有側流之掃流過濾的膜面受力分析上，可以看出膜面上的剪應力值，隨著側端物流質量流率的增加而增加。將 0.2 m/sec(12 g/sec)與 (6 g/sec : 6 g/sec)這兩種操作條件加以比較，可以發現當操作在 0.2 m/sec(12 g/sec)時整體的剪應力值較(6 g/sec : 6 g/sec)為大，但(6 g/sec : 6 g/sec)在流動方向的中間區域上，其剪應力值較大。
- 4.在有側流之掃流微過濾的實驗上，可以得到以下之結論：
 - (1).當側端物流的質量流率提升時，其濾速衰減程度較為緩慢。
 - (2).穩定濾速隨著側端物流的質量流率增加而有所增加。
 - (3).濾餅重及過濾總阻力隨著側端物流的質量流率增加而逐漸減少。
 - (4).在 0.2 m/sec(12 g/sec)與(6 g/sec : 6 g/sec)的比較上可以看到，(6 g/sec : 6 g/sec)的過濾效果較 0.2 m/sec(12 g/sec)為好。
- 5.在有側流之掃流微過濾的模擬分析中，相同的，也針對各種操作條件下的濾速衰減變化作擬穩態之模擬，因此可以得到在各時間點下的擬穩態阻力值，進而得到濾速與過濾總阻力之關係。
- 6.針對掃流膜過濾實驗中，不同過濾時間之濾餅重(W_c)、濾餅層厚度(L_c)與濾餅層的平均孔隙度(ε_{av})作動態分析，從分析中可以得到，濾餅的

重量隨著時間的增加而增加；濾餅層厚度隨著時間的增加而增加；濾餅平均孔隙度隨著時間的增加而減少。另外，可以從濾餅在膜面堆積的情形以及濾餅 SEM 的拍攝圖中看到，粒子在膜面堆積量的多寡及粒子與粒子間的疏密程度。

最後，在本研究中針對膜面上作受力的分析，可助於延緩膜面上的阻塞速率和增進掃流微過濾效能之研究發展。在此使用計算流體力學之輔助軟體，可有效地助於如何設計過濾系統，進而增加濾速、減少膜面上的阻塞及延長過濾的水洗週期。

在管式膜研究中主要探討管式膜過濾之薄膜表面上的受力情形，以及針對濾速的變化加以分析。在過濾程序中，藉由改變懸浮液濃度、過濾壓差，以及掃流速度，來探討不同操作條件對濾速之影響。並且，在過濾策略之改良上，本研究乃利用外加側流，與反洗操作的方式來改變濾室中的流力狀態。前者，使水力施予膜面上之剪應力增加，令過濾時因粒子沈積所造成之阻力降低；後者，則藉由於濾液端施加壓力，讓濾液透過薄膜，沖刷掉沈積在膜面上的顆粒，進而達到提升濾速的效果。然而，從濾速值、阻力、受力及粒子體積分率變化情形來進行分析，其結果可歸納如下：

1. 在管式膜過濾之實驗上，可得到以下結論：

- (1)由於懸浮液中的粒子含量直接影響到粒子輸送到達膜面的通量，增加粒子附著在膜面上的機率。因此，當在低濃度之懸浮液下操作時，粒子與膜面接觸的機率較低，所得到的濾速值較高；反之，當在高濃度之懸浮液下操作時，所得到的濾速值較低。
- (2)由於提高過濾壓差能夠增加水力施予膜面垂直方向之驅動力，進而促進懸浮液通過濾面，使得濾速值提升。因此，當在低過濾壓差下操作時，所得到的濾速值較低；反之，當操作在高過濾壓差下操作時，所得到的濾速值較高。

- (3)由於掃流流速之大小直接影響膜面之剪應力，當在高掃流速度下操作時，粒子被帶走的機率提高，粒子附著於薄膜表面的機會降低，使得阻塞的情況降低，進而濾速衰退的程度減緩，所得到的濾速值較高；反之，當操在低掃流速度下操作時，所得到的濾速值較低。
- (4)過濾總阻力隨著懸浮液濃度、過濾壓差的增加而增加；隨著掃流速度的增加而減少。

2. 在膜面受力情形之分析上，主要分為基本掃流過濾與有側流之掃流過濾兩部份：

- (1)從管式膜過濾的膜面受力分析上，可以看出膜面上的剪應力值，隨著掃流速度的增加而增加。
- (2)從外加側流之管式膜過濾之膜面受力分析上，可以看出膜面上的剪應力值，隨著側端物流質量流率的增加而增加。
- (3)將 0.4 m/sec(34 g/sec)與(17 g/sec : 17 g/sec)這兩種操作條件加以比較，可以發現(17 g/sec : 17 g/sec)剪應力值較 0.4 m/sec(34 g/sec)為大，估計過濾效果較好。

3. 在外加側流管式膜過濾之實驗上，可得到以下結論：

- (1)提升外加側流端物流的質量流率，有助於濾速衰退現象之減緩。
- (2)穩定濾速隨著側端物流的質量流率增加而有所增加。

(3)過濾總阻力隨著側端物流的質量流率增加而逐漸減少。

(4)在 0.4 m/sec (34 g/sec)與($17 \text{ g/sec} : 17 \text{ g/sec}$)的比較上可以看到， 0.4 m/sec (34 g/sec)的過濾效果較($17 \text{ g/sec} : 17 \text{ g/sec}$)好，符合受力分析之結果。

4. 在多相流模式之反洗模擬方面，可得到以下結論：

(1)由於薄膜表面上粒子的體積分率會隨著反洗時間的增加而降低。因此，反洗操作將有助於提升過濾效果。

(2)將 Case-1 與 Case-2 作比較，可發現在反洗操作 30s 下，膜面上粒子體積分率 Case-1 大於 Case-2，由此可知 Case-2 的過濾效果較 Case-1 佳。

5. 在間歇性反洗操作之管式膜過濾之實驗上，可得到以下結論：

(1)由於間歇性反洗操作可以破壞長期過濾下沈積於薄膜表面的濾餅層，減少附著於薄膜表面的粒子，使得阻塞的情況減少，進而濾速會相對提升。因此，在間歇性反洗操作下所得的濾速值較一般管式膜過濾操作高。

(2)在 Case-1 與 Case-2 的比較上可以看到，Case-2 的過濾效果較 Case-1 佳，與模擬結果相符合。

平板符號說明

A	: 薄膜的過濾面積	(m^2)
A	: Hamaker 常數	$(-)$
a	: 粒子半徑	(m)
C	: 懸浮液濃度	(kg/m^3)
C_1	: 視當時濾餅情形的修正因子	$(-)$
C_2	: 修正因子	$(-)$
C_3	: 修正因子	$(-)$
C_4	: 修正因子	$(-)$
C_5	: 經驗係數	$(-)$
D_e	: 相當直徑	(m)
d_p	: 微粒子的粒徑	(m)
Eu	: 尤拉數($E_u = P_o / \rho V^2$)	$(-)$
F_x	: x 方向的作用力	(N)
F_B	: 布朗運動作用力	(N)
F_E	: 靜電作用力	(N)
F_L	: 慣性提升力	(N)
F_n	: 施加在粒子上的正向拖曳力	(N)

F_t	:施加在粒子上的切線方向拖曳力	(N)
F_{VDW}	:凡得瓦爾力	(N)
f_c	:微粒子之間的摩擦係數	(-)
H	:距薄膜表面的高度	(m)
H	:乾淨濾材的雙平板系統之濾室高度	(m)
H	:粒子中心與固體表面之間的距離	(m)
h	:粒子中心到平板表面的距離	(m)
K	:比例常數	(-)
K	:透過率	(m ²)
K_L	:到邊界之距離的無因次比值,即粒子到膜面之距離與邊界到膜面之比值	(-)
K_f	:對角線矩陣,主要表示流體作用力增加造成流體與障礙物(系統邊界)之間的互相作用影響	(-)
K_p	:對角線矩陣,主要表示流體作用力增加造成粒子與障礙物(系統邊界)之間的互相作用影響	(-)
L_c	:濾餅厚度	(m)
m_p	:粒子質量	(kg)
n	:不同阻塞機構時的指標	(-)
P	:壓力	(N/ m ²)

P_0	: 初始壓力	(N/ m ²)
ΔP	: 過濾壓差	(N/ m ²)
P^*	: 無因次壓力 ($P^* = P / P_0$)	(-)
q	: 過濾的濾速	(m ³ / m ² · sec)
q_s	: 擬穩態濾速	(m ³ / m ² · sec)
R_c	: 濾餅阻力	(1/m)
R_{cp}	: 濃度極化所造成之阻力	(1/m)
Re	: 雷諾數 ($Re = D_e \rho V / \mu$)	(-)
R_{if}	: 薄膜內部阻塞之阻力	(1/m)
R_m	: 乾淨薄膜之阻力	(1/m)
R_t	: 總過濾阻力	(1/m)
s_f	: 空間因子	(-)
T	: 絕對溫度	(K)
t	: 過濾時間	(sec)
Δt	: 時間間距大小	(sec)
u_f	: 流經粒子中心的流體速度	(m/sec)
\vec{u}_f	: 流體流速	(m/sec)
$u_{f,s}$: 側流進口速度	(m/sec)
u_p	: 粒子的速度	(m/sec)

\bar{u}_p^*	:無因次速度($\bar{u}_p^* = \bar{u}_p / V$)	(-)
\bar{u}_p	:在多孔性薄膜內部的流體流速	(m/sec)
$u_{S,0}$:初始的平均掃流速度	(m/sec)
V	:濾液總體積	(m ³)
V	:流體速度	(m/sec)
v	:掃流速度	(m/sec)
\vec{v}	:速度向量	(m/sec)
v_z	:粒子朝膜面移動的速度	(m/sec)
$v_{recycle}$:回流速度	(m/sec)
W_c	:單位濾材面積上的濾餅重	(kg/m ²)

希臘字母

α_{av}	:平均過濾比阻	(m/kg)
β	:無因次透過率($\beta = D_e / k^{0.5}$)	(-)
ϵ_{av}	:平均孔隙度	(-)
ϵ_0	:自由空間的介電常數	(-)
ϵ_r	:誘電常數	(-)
γ	:膜表面上之剪應率(shear rate)	(1/sec)
γ_0	:膜面上的剪應率(shear rate)	(1/sec)
κ	:德拜長度(Debye length)的倒數	(1/m)
μ	:流體之黏度	(kg/m · sec)
ρ	:溶液密度	(kg/m ³)
ρ_s	:粒子密度	(kg/m ³)
ρ_f	:流體密度	(kg/m ³)
σ	:Stefan-Boltzmann 常數	(-)
τ_{xx}	:作用在 x 面(\vec{n})上的 x 方向作用力	(N/m ²)
τ_{yy}	:作用在 y 面(\vec{n})上的 y 方向作用力	(N/m ²)
τ_{zz}	:作用在 z 面(\vec{n})上的 z 方向作用力	(N/m ²)
τ_{xy}	:作用在 x 面(\vec{n})上的 y 方向作用力	(N/m ²)

τ_{yx}	:作用在 y 面(\vec{n})上的 x 方向作用力	(N/m ²)
τ_{yz}	:作用在 y 面(\vec{n})上的 z 方向作用力	(N/m ²)
τ_{zy}	:作用在 z 面(\vec{n})上的 y 方向作用力	(N/m ²)
τ_{xz}	:作用在 x 面(\vec{n})上的 z 方向作用力	(N/m ²)
τ_{zx}	:作用在 z 面(\vec{n})上的 x 方向作用力	(N/m ²)
ψ_m	:薄膜的表面電位	(V)
ψ_p	:粒子的表面電位	(V)
ζ	:Gaussian 亂數	(-)

管式膜符號說明

A	: 薄膜的過濾面積	(m^2)
A_{ab}	: Hamaker 常數	(-)
a	: 粒子半徑	(m)
C	: 懸浮液濃度	(kg/m^3)
D	: 擴散係數	(m^2/s)
F_B	: 布朗運動作用力	(N)
F_E	: 靜電作用力	(N)
F_L	: 慣性提升力	(N)
F_{VDW}	: 凡得瓦爾力	(N)
F_z	: z 方向的作用力	(N)
H	: 薄膜厚度	(m)
K_A	: 單位總過濾體積之膜孔表面阻塞面積	(1/m)
K_B	: 單位總過濾體積之孔道阻塞面積	(1/m)
K_C	: 單位總過濾體積之濾餅層阻塞面積	(1/m)
K_L	: 到邊界之距離的無因次比值，即粒子到膜面之距離與邊界到膜面之比值	(-)

K_f	:對角線矩陣，主要表示流體作用力增加造成流體 與障礙物(系統邊界)之間的互相作用影響	(-)
K_p	:對角線矩陣，主要表示流體作用力增加造成粒子 與障礙物(系統邊界)之間的互相作用影響	(-)
k	: 薄膜透過率	(-)
L	: 薄膜長度	(m)
m_p	:粒子質量	(kg)
\dot{m}_{pq}	:由 p^{th} 相至 q^{th} 相之質量傳遞	(kg/m ³ -s)
\dot{m}_{pp}	:由 p^{th} 相至 p^{th} 相之質量傳遞	(kg/m ³ -s)
\dot{m}_{qp}	:由 q^{th} 相至 p^{th} 相之質量傳遞	(kg/m ³ -s)
n	:不同阻塞機構時的指標	(-)
P	:過濾壓力	(N/ m ²)
P_0	:初始壓力	(N/ m ²)
ΔP	:過濾壓差	(N/ m ²)
Q	:濾液體積流率	(m ³ /s)
Q_0	:初始濾液體積流率	(m ³ /s)
q	:濾速	(m ³ / m ² · s)
q_o	:初始濾速	(m ³ /

$\text{m}^2 \cdot \text{s})$

\bar{R}_{pq}	: p 相與 q 相之間的交互作用力	(N)
\bar{R}_{qp}	: q 相與 p 相之間的交互作用力	(N)
\bar{R}_{qq}	: q 相與 q 相之間的交互作用力	(N)
R_b	: 粒子於薄膜內部阻塞產生的阻力	(1/m)
R_c	: 濾餅阻力	(1/m)
R_{cp}	: 濃度極化產生之阻力	(1/m)
R_m	: 乾淨薄膜之阻力	(1/m)
R_r	: 濾餅阻力與乾淨膜阻力之比例	(-)
R_t	: 過濾總阻力	(1/m)
s	: 溶液中溶質之質量分率	(-)
T	: 絕對溫度	(K)
t	: 過濾時間	(s)
Δt	: 時間間距大小	(s)
\bar{u}_f	: 薄膜內部之流體的流速	(m/s)
u_p	: 粒子的速度	(m/s)
V_p	: q 相之體積	(m^3)
\vec{v}	: 速度向量	(m/s)
v	: 進料端流度	(m/s)

v_1	: 滲液端流度	(m/s)
v_2	: 濃排端流度	(m/s)
v_x	: 粒子 x 方向移動的速度	(m/s)
v_y	: 粒子 y 方向移動的速度	(m/s)
v_z	: 粒子 z 方向移動的速度	(m/s)
W	: 薄膜寬度	(m)
W_c	: 單位面積薄膜上的滲餅重	(kg/m ²)

希臘字母

α_{av}	: 平均過濾比阻	(m/kg)
α_q	: q 相之體積分率	(-)
ε_0	: 介電常數	(-)
ε_r	: 誘電常數	(-)
γ	: 膜表面上之剪應率(shear rate)	(1/s)
κ	: 德拜長度(Debye length)的倒數	(1/m)
μ	: 流體黏度	(kg/m · sec)
$\hat{\rho}_q$: q 相之有效密度	(kg/m ³)
ρ	: 溶液密度	(kg/m ³)
σ	: 波茲曼常數	(-)
τ_{xx}	: 作用在 x 面(\vec{n})上的 x 方向作用力	(N/m ²)
τ_{yy}	: 作用在 y 面(\vec{n})上的 y 方向作用力	(N/m ²)
τ_{zz}	: 作用在 z 面(\vec{n})上的 z 方向作用力	(N/m ²)
τ_{xy}	: 作用在 x 面(\vec{n})上的 y 方向作用力	(N/m ²)
τ_{yx}	: 作用在 y 面(\vec{n})上的 x 方向作用力	(N/m ²)
τ_{yz}	: 作用在 y 面(\vec{n})上的 z 方向作用力	(N/m ²)
τ_{zy}	: 作用在 z 面(\vec{n})上的 y 方向作用力	(N/m ²)

τ_{xz}	:作用在 x 面(\vec{n})上的 z 方向作用力	(N/m ²)
τ_{zx}	:作用在 z 面(\vec{n})上的 x 方向作用力	(N/m ²)
ψ_m	:薄膜的表面電位	(V)
ψ_p	:粒子的表面電位	(V)
ζ	:Gaussian 亂數	(-)

參考文獻

- Adham, S. S., Snoeyink, V. L., Clark, M. M., and C. Anselme, "Predicting and Verifying TOC Removal by PAC in Pilot-Scale UF System," *Journal of American Water Works Association*, 85, 58-68 (1993).
- Ahn, K. H., Cha, H. Y., Yeom, I. T., and K. G. Song, "Application of Nanofiltration for Recycling of Paper Regeneration Wastewater and Characterization of Filtration Resistance," *Desalination*, 119, 169-176 (1998).
- Aimar, P., Howell, J. A., Clifton, M. J., and V. Sanchez, "Concentration Polarization Build-up in Hollow Fiber: A Measurement and Its Modeling in Ultrafiltration," *Journal of Membrane Science*, 59, 81-99 (1991).
- Bader, M. S. H., "Nanofiltration for Oil-fields Water Injection Operations: Analysis of Concentration Polarization," *Desalination*, 201, 106-113 (2006).
- Baker, R. J., Fane, A. G., Fell, C. J. D., and B. H. Yoo, "Factors Affecting Flux in Crossflow Filtration," *Desalination*, 53, 81-96 (1985).
- Berman, A.S. "Laminar Flow in Channels with Porous Walls," *J. Appl. Phys.*, 24, 1232-1235 (1953).
- Bird, R. B., Stewart, E. W., and N. E. Lightfoot, "Transport Phenomena," JOHN WILEY and SONS Inc. US, 74-91, 189-194 (1960).
- Blatt, W. F., Dravid, A., Michael, A. S., and L. Nelson, "Solute Polarization and Cake Formation in Membrane Ultrafiltration: Cause, Consequences, and Control Techniques," *Membrane Science and Technology*, 47, J. E. Flinn, (Ed.), Plenum Press, New York (1970).

- Bowen, W. R., Calvo, J. I., and A. Hernandez, "Steps of Membrane Blocking in Flux Decline During Protein Microfiltration," *Journal of Membrane Science*, 101, 153-165 (1995).
- Cox, R.G. and Brenner, H. "The Lateral Migration of Solid Particles in Poiseuille Flow—I. Theory," *Chem. Eng. Sci.*, 23, 147-173 (1968).
- Cox, R.G. and Hsu, S.K. "The Lateral Migration of Solid Particles in A Laminar Flow near A Plane," *Int. J. Multiphase Flow*, 3, 201-222 (1977).
- Davis, R. H., and S. A. Birdsell, "Hydrodynamic Model and Experiments for Crossflow Microfiltration," *Chemical Engineering Communication*, 49, 217-229 (1987).
- Deen, W.M. "Hindered Transport of Large Molecules in Liquid-filled Pores.," *A.I.Ch.E. J.*, 33, 1409-1425 (1987).
- Drew, D.A., Schonberg, J.A. and Belfort, G. "Lateral Inertial Migration of A Small Sphere in Fast Laminar Flow through A Membrane Duct, " *Chem. Eng.Sci.*, 46, 3219-3224 (1991).
- Field, R. W., Wu, D., Howell, J. A., and B. B. Gupat, "Critical Flux Concept foe Microfiltration Fouling," *Journal of Membrane Science*, 100, 259-272 (1995).
- Fischer, E., and J. Raasch, "Cross-Flow Filtration," *German Chemical Engineering*, 8, 211-230 (1985).
- Franken, T., "Membrane Selection – More than Material Properties Alone," *Membrane Technology*, 97, 7-10 (1997).
- Frey, J.M. and Schmitz, P. "Particle Transport and Capture at the Membrane Surface in Cross-flow Microfiltration, " *Chem. Eng. Sci.*, 55, 4053-4065 (2000).

- Fritzsche, A. K., Arevalo, A. R., Moore, M. D., Elings, V. B., Kjoller, K., and C. M. Wu, "The Surface Structure and Morphology of Polyvinylidene Fluoride Microfiltration Membranes by Atomic Force Microscopy," *Journal of Membrane Science*, 68, 65 (1992).
- Günder, B. "The Membrane-coupled Activated Sludge Process in Municipal Wastewater Treatment," Technomic Publishing Co. Inc., Lancaster, PA, USA , (2001).
- Gupta, B. B., Howell, J. A., Wu, D., and, R. W. Field, "A Helical Baffle for Cross-flow Microfiltration," *Journal of Membrane Science*, 99, 31-42 (1995).
- Hermas, Bredee; *Jo. of floc. Ind.*, 10, (1936).
- Hermia, J. "Constant Pressure Blocking Filtration Laws-application to Power-law Non-Newtonian Fluids," *I. Chem.Eng.*, 60, 183-187 (1982).
- Ho, W. S., and K. K. Sirkar, *Membrane Handbook*, Van Nostrand Reinhold, New York (1992).
- Hoek, E. M. V., Kim, A. S. and Elimelech, M. "Influence of Crossflow Membrane Filter Geometry and Shear Rate on Colloid Fouling in Reverse Osmosis and Nanofiltration Separations," *Environmental Eng. Sci.*, 19, 357-372 (2002).
- Huotari, H. M., Tragardh, G., and I. H. Huisman, "Crossflow Membrane Filtration Enhanced by An External DC Electric Field : A Review," *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, Vol. 77, part A, July, p.461-468 (1999).
- Hwang, K. J., Yu, M. C., and W. M. Lu, " Migration and Deposition of Submicron Particles in Crossflow Microfiltration," *Separation Science and Technology*, 32, 2723-2747 (1997).
- Hwang, K. J., Chang, D.J. and Hsu, F. C. "Steady-state Permeate Flux of Cross-flow Microfiltration," *J. Membr. Sci.*, " 98, 97-106 (1995).

- Hwang, K. J., Yu, Y. H. and Lu, W. M. "Cross-flow Microfiltration of Submicron Microbial Suspension," J. Membr. Sci., 194, 229-243 (2001).
- Hwang, K. J. and Liu, H. C. "Cross-flow Microfiltration of Aggregated Submicron Particles," J. Membr. Sci., 201, 137-148 (2002).
- Hwang, K. J. and Hseuh, C. L. "Dynamic Analysis of Cake Properties in Microfiltration of Soft Colloids," J. Membr. Sci., 214, 259-273 (2003).
- Hwang, K. J. and Cheng, Y. H. "The Role of Dynamic Membrane in Cross-flow Microfiltration of Macromolecules," Sep. Sci. Technol., 38, 779-795 (2003).
- Hwang, K. J., Cheng, Y.H. and Tung, K. L. "Modeling of Cross-flow Microfiltration of Fine Particle/Macromolecule Binary Suspension," J. Chem. Eng., Japan, 36, 1488-1497 (2003).
- Hwang, K. J. and Lin, L. W. "Separation of Protein from Microbe/Protein Binary Suspension Using a Cross-flow Microfiltration," J. Chem. Eng., Japan, 38, 894-902 (2005).
- Hwang, K. J., Chou, F. Y. and Tung, K. L. "Effects of Operation Conditions on the Performance of Cross-flow Microfiltration of Fine Particle/Protein Binary Suspension," J. Membr. Sci., 274, 183-191 (2006).
- Iritani, E., Mukai, Y., Tanaka, Y., and T. Murase, "Flux decline behavior in dead-end microfiltration of protein solution," Journal of Membrane Science, 103, 181 (1995).

- Kang, S. K., and K. H. Choo, "Use of MF and UF Membrane for Reclamation of Glass Industry Wastewater Containing Colloidal Clay and Glass Particles," *Journal of Membrane Science*, 223, 89-103 (2003).
- Kim, K. J., Chen, V., and A. G. Fane, "Some Factors Determining Protein Aggregation during Ultratration," *Biotechnology and Bioengineering*, 42, 260 (1993).
- Kim, M. and Zydney, A. L. "Effect of Electrostatic, Hydrodynamic, and Brownian Forces on Particle Trajectories and Sieving in Normal Flow Filtration," *J. Colloid Interface Sci.*, 269, 425-431 (2004).
- Kim, M., and A. L. Zydeny, "Theoretical Analysis of Particle Trajectories and Sieving in a Two-Dimensional Cross-flow Filtration System," *Journal of Membrane Science*, 281, 666-675 (2006).
- Kuberkar, V. T. and R. H. Davis, "Microfiltration of Protein-cell Mixtures with Crossflushing or Backflushing," *Journal of Membrane Science*, 183, 1-14 (2001).
- Kleinstreuer, C. and Paller, M. S. "Laminar Dilute Suspension Flows in Plate and Frame Ultrafiltration Units, " *A.I.Ch.E. J.*, 29, 529-533 (1983).
- Kuberkar, V. T. and Davis, R. H. "Microfiltration of Protein-cell Mixtures with Crossflushing or Backflushing," *J. Membr. Sci.*, 183, 1-14 (2001).
- Lu, W. M., and S. C. Ju, "Selctive Particle Deposition in Cross-Flow Filtration," *Separation Science and Technology*, 24, 517-540 (1989).
- Ma, H., Bowman, C. N., and R. H., Davis, "Membrane Fouling Reduction by Backpulsing and Surface Modification," *Journal of Membrane Science*, 173, 191-200 (2000).

- Mericer, M., Lagane, C., C. Fonade, "Influence of A Gas/Liquid Two-Phase Flow on the Ultrafiltration and Microfiltration Performances: Case of A Ceramic Flat Sheet Membrane," *Journal of Membrane Science*, 180, 93-102 (2000).
- Metcalf & Eddy, Inc., "Wastewater Engineering: Treatment and Reuse," 4th ed., McGraw Hill, Boston (2003).
- Millward, H. R., Bellhouse, B. J., Sobey, I. J. and R. W. H. Lewis, "Enhancement of Plasma Filtration Using the Concept of the Vortex Wave," *Journal of Membrane Science*, 100, 121-129 (1995).
- Mulder, M., "Basic Principles of Membrane Technology," Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, 5-24, 198-311 (1991).
- Murkes, J., "Parafiltration – A New Advanced Filtration Technology," *Filtration and Separation*, 20, 21 (1983).
- Nassehi, V. "Modeling of Combined Navier-Stokes and Darcy Flows in Crossflow Membrane Filtration," *Chem. Eng. Sci.*, 53, 1253-1265 (1998).
- Nakanishi, K., Tadokoro, T. and Matsuno, R. "On the Specific Resistance of Microorganisms," *Chem. Eng. Commun.*, 62, 187-201 (1987).
- Pihlajamäki, A., Vaisanen, P., and M. Nystrom, "Characterization of Clean and Fouled Polymeric Ultrafiltration Membranes by Fourier Transform IR Spectroscopy-attenuated Total Reflection," *Colloids and Surfaces. A, Physicochemical and Engineering Aspects*, 138, 323 (1998).
- Pirbazari, M., Badriyha, B. N., and V. Ravindran, "MF-PAC for Treating Water Contaminated with Natural and Synthetic Organics," *Journal / American Water Works Association*, 83, 61-68 (1992).
- Rautenbach, R., and R. Albrecht, "Membrane Process," John Wiley & Sons Ltd., New York, 10-44, 272-334 (1989).

- Rodgers, V. G. J., and R. E. Sparks, "Reduction of Membrane Fouling in Portein Ultrafiltration," *AICHE Journal*, 37, 1517-1528 (1991).
- Romero, C. A. and Davis, R. H. "Transient Model of Crossflow Microfiltration," *Chem. Eng. Sci.*, 45, 13-25 (1990).
- Ruchton, A., and G. S. Zhang, , "Rotary Microporous Filtration," *Desalination*, 70, 379-394 (1988).
- Schulz, G., and S. Ripperger, "Concentration Polarization in Croflow Mircofiltration," *Journal of Membrane Science*, 40, 173-184 (1989)
- Schwingea, J., Wiley, D. E., Fane, A. G., and R. Guenther, "Characterization of a Zigzag Spacer for Ultrafiltration," *Journal of Membrane Science*, 172, 19-31 (2000).
- Segre, G. and Silberberg, A. "Behavior of Macroscopic Rigid Spheres in Poiseuille Flow. Part 2. Experimental Results and Interpretation, " *J. Fluid Mech.*, 14, 136-157 (1962).
- Shopov, P. J. and Iordanov, Y. I. "Numerical Solution of Stokes Equations with Pressure and Filtration Boundary Conditions," *J. Computational Physics*, 112, 12-23 (1994).
- Shin, C. "Finite Element Simulation of Deep Bed Filtration," *Chem. Eng. Sci.*, 61, 2324-2329 (2006).
- Singh, R. and Laurence, R. L. "Influence of Slip Velocity at A Membrane Surface on Ultrafiltration Performance—I. Channel flow system, " *Int. J. Heat Mass Transfer*, 22, 721-729 (1979).
- Song, L., and Tay, K. G. "Performance Prediction of A Long Crossflow Reverse Osmosis Membrane Channel," *J.Membr.Sci.*, 281, 163-169 (2006).

- Su, T. J., Lu, J. R., Cui, Z. F., Bellhouse, B. J., Thomas, R. K., and R. K. Heenan, "Identification of the Location of Protein Fouling on Ceramic Membrane under Dynamic Filtration Condition," *Journal of Membrane Science*, 163, 265 (1999).
- Sutherland, K., "Profile of the International Membrane Industry," 2nd ed., Elsevier, Amsterdam (2000).
- Tanaka, T., Kamimura, R., Fujiwara, R. and Nakanishi, K. "Crossflow Filtration of Yeast Broth Cultivated in Molasses," *Biotechnol. Bioeng.*, 43, 1094-1101 (1994).
- Tiller, F.M. and Green, T.C. "The Role of Porosity in Filtration. IX. Skin Effect with Highly Compressible Materials," *A.I.Ch.E. J.*, 19, 1266-1269 (1973).
- Tiller, F. M., "Theory and Practice of Solid-liquid Separation," Univ. of Houston, Houston, TX, U.S.A. (1975).
- Vasseur, P. and Cox, R.G. "The Lateral Migration of Spherical Particle in Two-dimensional Shear Flows, " *J. Fluid Mech.*, 78, 385-413 (1976).
- Vigneswaran, S., and Y. K. Wong, "Detailed Investigation of Effects of Operating Parameters of Ultrafiltration Using Laboratory-scale ultrafiltration unit," *Desalination*, 70, 299-316 (1988).
- Vrouwenvelder, J. S., van Paassen, J. A. M., Wessels, L. P., van Dam, A. F. and Bakker, S. M. "The Membrane Fouling Simulator: A Practical Tool for Fouling Prediction and Control," *J. Membr. Sci.*, 281, 316-324 (2006).
- Wakeman, R. J., and E. S. Tarleton, "Understanding Flux Decline in Crossflow Microfiltration: Part I-Effect of Particle and Pore Size," *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, 71, Part A, p.399-410 (1993).

Wakeman, R. J., and E. S. Tarleton, "Understanding Flux Decline in Crossflow Microfiltration: Part II-Effect of Process and Parameter," Transactions of the Institution of Chemical Engineers, 72, Part A, p.431-440 (1994).

Weigert, T., Altmann, J., and, S. Ripperger, "Crossflow Electrofiltration in Pilot Scale," Journal of Membrane Science, 159, 253-262 (1999).

Xu, N., Zhong, Y., and J. Shi, "Crossflow Microfiltration of Micro-Sized Mineral Suspension Using Ceramic Membranes," Chemical Engineering Research and Design, 80, 215-221 (2002).

Zeman, L. J., and A. L. Zydney, "Microfiltration and Ultrafiltration," Marcel, Dekker, New York (1996).

Zydney, A. L., and C. K. Colton, "A Concentration Polarization Model for the Filtrate Flux in Crossflow Microfiltration of Particulate Suspensions," Chemical Engineering Communication, 47, 1-21 (1986).

呂維明, "固液過濾技術", 高立書局有限公司, (2004)

余美周, 「次微米粒子之掃流過濾」, 碩士論文, 淡江大學化學工程學系(1996)。

黃信杰, 「操作條件對酵母菌/牛血清蛋白雙成份懸浮液之掃流微過濾性能之影響」, 碩士論文, 淡江大學化學工程與材料工程學系(2005)。

蕭瑞昌，“利用水溶性幾丁聚醣以薄膜過濾法去除微量之金屬離子”，

碩士論文，元智大學化學工程學系，中壢，(1997)